

Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais



ENGENHARIA HÍDRICA

**IMPACTOS DOS LIMITES DE
AQUECIMENTO GLOBAL NA
DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NO BALANÇO
HIDROLÓGICO DE MINAS GERAIS**

Gabriel de Freitas Moura

Itajubá - MG
Dezembro / 2025

IMPACTOS DOS LIMITES DE AQUECIMENTO GLOBAL NA DISPONIBILIDADE HÍDRICA E NO BALANÇO HIDROLÓGICO DE MINAS GERAIS

Gabriel de Freitas Moura

Monografia submetida à banca examinadora
do Trabalho Final de Graduação apresentado
à Universidade Federal de Itajubá, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de Engenheiro Hídrico.

Orientadora: Prof.^a Dra. Fabrina Bolzan Martins

Coorientadora: Msc. Flávia Fernanda Azevedo Fagundes

Itajubá - MG
Dezembro / 2025

Folha de Aprovação



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
Instituto de Recursos Naturais
Engenharia Hídrica

FOLHA DE APROVAÇÃO

O Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Hídrica do(a) aluno(a) GABRIEL DE FREITAS MOURA intitulado “Impactos dos limiares de aquecimento global na disponibilidade hídrica e no balanço hidrológico de Minas Gerais” foi APROVADO.

Itajubá, 3 de dezembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **FABRINA BOLZAN MARTINS**
Data: 05/12/2025 15:50:03-0300
Verifique em <https://validar.itj.gov.br>

FABRINA BOLZAN MARTINS
Presidente / Orientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **FLÁVIA FERNANDA AZEVEDO FAGUNDES**
Data: 05/12/2025 16:04:30-0300
Verifique em <https://validar.itj.gov.br>

FLÁVIA FERNANDA AZEVEDO FAGUNDES
Coorientador(a)

Documento assinado digitalmente
 **ARTHUR BENEDICTO OTTONI**
Data: 05/12/2025 10:53:04-0300
Verifique em <https://validar.itj.gov.br>

ARTHUR BENEDICTO OTTONI

Documento assinado digitalmente
 **CÁSSIA GABRIELE DIAS**
Data: 04/12/2025 08:58:37-0300
Verifique em <https://validar.itj.gov.br>

CÁSSIA GABRIELE DIAS

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, pela saúde, força e sabedoria concedido em todos os momentos da minha vida, mas especialmente ao longo dessa jornada.

Dedico agradecimentos especiais aos meus pais, Vicente Cardoso de Moura Junior e Darcilene de Freitas Elisiário Moura, por todo o suporte, apoio, carinho, amor, paciência e incentivo que me deram força e coragem ao longo da vida e me proporcionaram a oportunidade de me dedicar aos estudos. Suas palavras de encorajamento foram essenciais para que eu pudesse superar os desafios deste trabalho.

Aos meus irmãos, Victor Daniel de Freitas Moura e Julia de Freitas Moura, por sempre estarem ao meu lado, incentivando-me e trazendo leveza nos momentos mais difíceis.

Expresso também minha profunda gratidão à minha orientadora, Dr. Fabrina Bolzan Martins, por toda orientação, paciência, ensinamentos, confiança e pelas valiosas contribuições, que foram essenciais para o desenvolvimento deste trabalho, mas também para o meu crescimento profissional.

Meus sinceros agradecimentos à Flávia Fernanda, minha coorientadora, por toda a ajuda ao longo do trabalho, que sempre dedicou seu tempo e atenção para esclarecer dúvidas que surgiram ao longo dessa jornada.

Por fim, não posso deixar de agradecer à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte institucional e pela infraestrutura oferecida, que foram fundamentais para a realização deste trabalho. Agradeço também aos professores e colegas que contribuíram com seus conhecimentos e incentivo ao longo da pesquisa, enriquecendo minha trajetória acadêmica e profissional.

RESUMO

Este trabalho analisa os impactos dos limiares de aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica no estado de Minas Gerais, considerando os limites estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5 °C e 2 °C) e limiares adicionais de 3 °C e 4 °C. Com base em projeções climáticas de múltiplos modelos do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* (NEX-GDDP-CMIP6), foram avaliadas as variações nas variáveis do balanço hídrico climatológico: evapotranspiração real (ETR), deficiência hídrica (DEF) e excedente hídrico (EXC), sob dois cenários socioeconômicos (SSP2-4.5 e SSP5-8.5). Também foram analisadas as anomalias dessas variáveis em relação ao período de referência, bem como o comportamento sazonal da DEF e do EXC. Os resultados indicam intensificação da deficiência hídrica e redução do excedente hídrico com o aumento da temperatura, especialmente nas mesorregiões Norte, Noroeste e Jequitinhonha, que se mostraram mais vulneráveis. Em contrapartida, o Sul/Sudoeste e parte da Zona da Mata apresentam maior resiliência até os limiares de 2°C, mas passam a registrar aumento na ocorrência de eventos hídricos extremos nos limiares de 3°C e 4°C. Verificou-se que o aquecimento global intensifica a demanda evaporativa, compromete a recarga dos aquíferos e reduz a regularidade das vazões, elevando o risco de escassez e de conflitos pelo uso da água. Diante desse cenário, ressalta-se a necessidade de estratégias adaptativas regionais baseadas na eficiência hídrica, no reflorestamento, no monitoramento hidroclimático e na implantação de infraestrutura verde, como instrumentos fundamentais para o fortalecimento da segurança hídrica e a mitigação das vulnerabilidades associadas às mudanças climáticas.

Palavras-Chave: Mudanças Climáticas; Segurança Hídrica; Balanço Hídrico Climatológico.

ABSTRACT

This study analyzes the impacts of global warming thresholds on water availability in the state of Minas Gerais, Brazil, considering the thresholds established by the Paris Agreement (1.5 °C and 2 °C) and additional thresholds of 3 °C and 4 °C. Based on climate simulations and projections from multiple climate models from the NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections (NEX-GDDP-CMIP6), variations in the climatological water balance variables: actual evapotranspiration (ETR), water deficit (DEF), and water surplus (EXC), were assessed under two socioeconomic scenarios (SSP2-4.5 and SSP5-8.5). The anomalies of these variables relative to the reference period were also examined, along with the seasonal behavior of DEF and EXC. The results indicate an intensification of water deficit and a reduction in surplus with rising temperatures, particularly in the North, Northwest, and Jequitinhonha mesoregions, which proved to be the most vulnerable. Conversely, the South/Southwest and parts of the Zona da Mata show greater resilience up to the 2 °C threshold but tend to experience an increase in extreme hydrological events at higher warming levels. Global warming was found to enhance evaporative demand, compromise aquifer recharge, and reduce streamflow regularity, thereby increasing the risks of water scarcity and conflicts over water use. Given these findings, the study highlights the need for regional adaptive strategies focused on water-use efficiency, reforestation, hydroclimatic monitoring, and green infrastructure as essential measures to strengthen water security and reduce vulnerabilities in the face of climate change.

Keywords: Climate Change; Water Security; Climatological Water Balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo (Painel A), estado de Minas Gerais e suas mesorregiões, altitude e cursos d'água (Painel B).....	14
Figura 2: Aumento da temperatura do ar na superfície global acima da temperatura pré-industrial.	19
Figura 3: Anomalias na temperatura do ar na superfície em 2024.....	20
Figura 4: Exemplificação da Evapotranspiração potencial ou de referência: em condições meteorológicas padrão, com cultura de referência e solo sem restrição hídrica.	22
Figura 5: Exemplo do Comportamento das variáveis do BHC ao longo do ano, a partir das variáveis de precipitação (P , mm mês^{-1}), evapotranspiração potencial (ETP , mm mês^{-1}), evapotranspiração real (ETR , mm mês^{-1}) e deficiência hídrica (DEF , mm mês^{-1})....	25
Figura 6: Índice de Segurança Hídrica (ISN) - Cenário 2035.....	27
Figura 7: Representação esquemática da metodologia para a identificação do ano em que se projeta atingir o aquecimento médio global de $1,5^{\circ}\text{C}$, 2°C , 3°C , e 4°C	34
Figura 8: Passo a passo de cômputo do balanço hídrico climatológico (BHC) para obter evapotranspiração real (ETR , mm mês^{-1}), deficiência hídrica (DEF , mm mês^{-1}) e excedente hídrico (EXC , mm mês^{-1}). CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); ETP = evapotranspiração potencial (mm mês^{-1}); P = precipitação (mm mês^{-1}); NAC = negativo acumulado (mm mês^{-1}); ARM = armazenamento de água no solo (mm); ALT = alteração do armazenamento (mm mês^{-1}) entre os períodos i e $i-1$; +=soma dos valores positivos mensais de $P-ETP$ (estação chuvosa); -=soma dos valores negativos mensais de $P-ETP$ (estação seca); i se refere ao mês do ano ($1 = \text{janeiro}$, $2 = \text{fevereiro}$, ..., $12 = \text{dezembro}$).	35
Figura 9: Padrão médio do ensemble mean da temperatura do ar próximo à superfície ($^{\circ}\text{C}$) e da precipitação acumulada anual (mm ano^{-1}) para os limiares de aquecimento de $1,5^{\circ}\text{C}$ (Painéis A, B, I e J), 2°C (Painéis C, D, K e L), 3°C (Painéis E, F, M e N) e 4°C (Painéis G, H, O e P) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E, G, I, K, M e O) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F, H, J, L, N e P). O número de modelos usados para calcular a média é indicado no canto inferior direito de cada painel.	40

Figura 10: Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração real (ETR; mm ano⁻¹, painéis A, D, G, J), deficiência hídrica (DEF; mm ano⁻¹, painéis B, E, H, K) e excedente hídrico (EXC; mm ano⁻¹, painéis C, F, I, L) para o período de referência (1995–2014) e para três limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C e 3°C). São apresentadas também as anomalias anuais de ETR (painéis M, P, S), DEF (painéis N, Q, T) e EXC (painéis O, R, U) em relação ao período de referência (PR = 1995-2014), considerando o cenário socioeconômico SSP2-4.5. 44

Figura 11: Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração real (ETR; mm ano⁻¹, painéis A, D, G, J e M), deficiência hídrica (DEF; mm ano⁻¹, painéis B, E, H, K e N) e excedente hídrico (EXC; mm ano⁻¹, painéis C, F, I, L e O) para o período de referência (1995–2014) e para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C). São apresentadas também as anomalias anuais de ETR (painéis P, S, V e Y), DEF (painéis Q, T, W e Z) e EXC (painéis R, U, X e AA) em relação ao período de referência (PR = 1995-2014), considerando o cenário socioeconômico SSP5-8.5..... 45

Figura 12: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹) para três limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C e 3°C) para o cenário socioeconômico SSP2-4.5. 47

Figura 13: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹) para três limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C e 3°C) para o cenário socioeconômico SSP2-4.5. 49

Figura 14: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹) para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) para o cenário socioeconômico SSP5-8.5. 50

Figura 15: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹)

para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.	51
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Lista dos Modelos de Circulação Geral (MCGs) do conjunto de dados do NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections (NEX-GDDP-CMIP6) utilizados neste estudo.....	30
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BHC - Balanço hídrico climatológico

CAD - Capacidade de água disponível

CMIP6 - Coupled Models Intercomparison Project Phase 6

COP21 - 21ª Conferência das Partes

DEF - Deficiência hídrica

ET – Evapotranspiração

ETc – Evapotranspiração da Cultura

ETP - Evapotranspiração potencial

ETr - Evapotranspiração real

EXC - Excedente hídrico

GLDAS-2 - NASA Global Land Data Assimilation System Version 2

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

MCG's - Modelos de circulação geral

NCCS – NASA Center for Climate Simulation

NEX-GDDP- CMIP6 - NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections

P – Precipitação

PR - Período de Referência

Tas – Temperatura Média do ar

UNFCCC - Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Acordo de Paris e Limiares de Aquecimento Global.....	18
3.2. Evapotranspiração.....	21
3.3. Balanço Hídrico Climatológico	24
3.4. Segurança Hídrica: Escassez Hídrica e Excesso Hídrico	25
4. dados e METODOLOGIA	28
4.1. Área de Estudo.....	28
4.2. Dados Climáticos	29
4.3. Dados Edáficos	32
4.4. Passos para identificar os anos de aquecimento e para calcular o balanço hídrico climatológico (BHC)	32
4.5. Impactos dos limiares de aquecimento global no BHC	36
5.1. Análise dos padrões da temperatura e precipitação associados aos períodos de aquecimento em Minas Gerais	38
5.2. Balanço hídrico climatológico sobre os quatro limares de aquecimento.....	40
6. Conclusão	59
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	60

1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são essenciais no desenvolvimento socioeconômico, na sustentabilidade ambiental e na segurança hídrica em escala global. O Brasil, detentor de aproximadamente 12% da água doce superficial do planeta (ANA, 2021), abriga importantes sistemas hidrológicos, como as bacias do Amazonas, São Francisco e Paraná (GOMES et al., 2004), além do Aquífero Guarani, um dos maiores reservatórios de águas subterrâneas do mundo (CETESB; REBOUÇAS et al., 2002). Esses recursos exercem múltiplas funções essenciais: garantem o abastecimento humano, sustentam a produção agrícola e a segurança alimentar, viabilizam a geração de energia, apoiam atividades industriais e contribuem para a regulação ambiental (AHMED et al., 2024; RODRIGUES et al., 2022; CRUVINEL et al., 2022).

De acordo com a UN-Water (2013), segurança hídrica é a capacidade de uma população garantir de forma sustentável, o acesso a volumes adequados de água, com qualidade satisfatória, assegurando o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico e a mitigação de desastres relacionados à água. Apesar da aparente abundância hídrica, o Brasil enfrenta desafios crescentes na gestão da água devido ao aquecimento global, mudanças no uso do solo e pressões antrópicas (RUFINO et al., 2025). A queda dos níveis de águas subterrâneas, a redução das vazões, a distribuição desigual da água, o aumento das temperaturas e as mudanças nos regimes de precipitação constituem os principais riscos à segurança hídrica e à estabilidade dos sistemas hidrológicos nacionais (RUFINO et al., 2025; PNSH, 2019).

Entre as regiões mais susceptíveis, destaca-se o estado de Minas Gerais (Figura 1), considerado um hotspot de mudanças climáticas persistentes (FAGUNDES et al., 2025; DIAS et al., 2024; RIBEIRO et al., 2024), onde os efeitos dessas alterações já são evidentes (RIBEIRO et al., 2024).

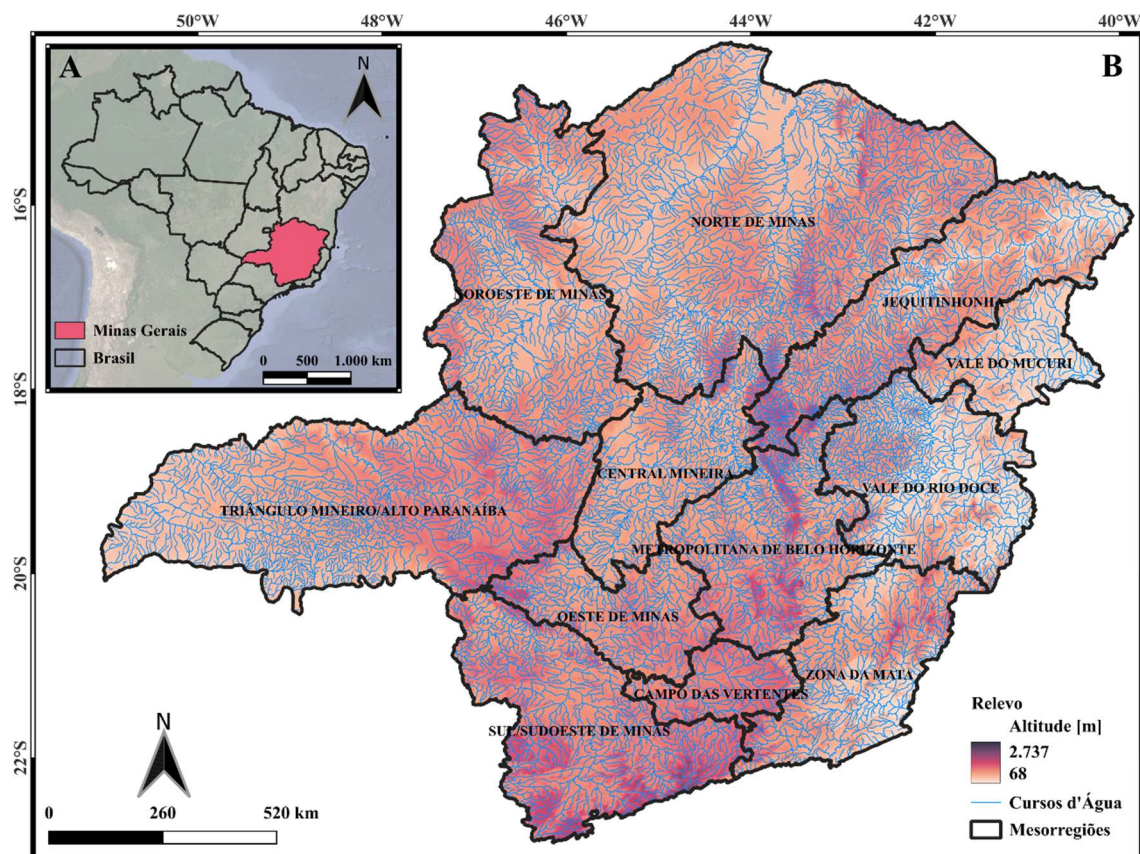


Figura 1: Localização da área de estudo (Painel A), estado de Minas Gerais e suas mesorregiões, altitude e cursos d'água (Painel B).

Fonte: Autoria Própria, 2025. (Adaptado de ANA - Mesorregiões, 2013).

Em Minas Gerais, tem-se observado um aumento na frequência e intensidade de eventos extremos, como secas prolongadas, ondas de calor e chuvas intensas (ÁVILA-DIAZ et al., 2020; SILVA et al., 2022; DE CARVALHO et al., 2013). Tais fenômenos comprometem a disponibilidade hídrica, afetam a segurança alimentar e energética e exacerbam os riscos para populações vulneráveis. Além disso, sobrecarregam os sistemas de drenagem e reduzem a infiltração de água no solo, o que aumenta o escoamento superficial e amplifica o impacto das enchentes (SANTOS et al., 2010; BOOGAARD et al., 2022; LOMBARDI et al., 2023). Entre as consequências mais recorrentes desses eventos estão alagamentos de vias e residências, interrupções no transporte, contaminação da água e do solo, danos à infraestrutura urbana (como ruas, calçadas e redes de esgoto), prejuízos econômicos e riscos à saúde pública devido ao contato com águas contaminadas (MEDEIROS et al., 2019; NETO et al., 2019).

Os impactos desses eventos climáticos recaem de forma desproporcional sobre populações vulneráveis, especialmente aquelas que vivem em áreas de risco, onde a infraestrutura precária e a ocupação irregular potencializam os danos materiais e a exposição a deslizamentos de terra e inundações catastróficas. Dados recentes evidenciam

essa vulnerabilidade: apenas no primeiro mês do período chuvoso de 2024/2025, Minas Gerais registrou 25 óbitos, 3.210 desalojados e 343 desabrigados em decorrência de precipitações extremas (CNN BRASIL, 2025). Esses números refletem a crescente exposição das populações a eventos climáticos, cuja frequência e intensidade vêm se ampliando devido às mudanças climáticas (AVILA-DIAZ et al., 2020; DE CARVALHO et al., 2013).

Paralelamente, os episódios de seca prolongados também têm se intensificado, afetando de forma sistêmica os setores hídrico, agrícola e energético. Como exemplo, em 2024, Minas Gerais decretou situação de emergência em 135 municípios até o mês de agosto, ou seja, um marco alcançado dois meses antes em comparação a 2023 (G1, 2024). Essa antecipação temporal na declaração de emergências hídricas evidencia o agravamento progressivo dos extremos climáticos e reforça a urgência na implementação de estratégias eficazes de adaptação e mitigação.

Na tentativa de frear os avanços de tais eventos e reduzir os riscos e vulnerabilidades aos sistemas hidrológicos, a 21ª Conferência das Partes (COP21) propôs o Acordo de Paris, com o objetivo de limitar o aquecimento médio global a um limiar de 1,5°C e inferior a 2°C, com esforços para não ultrapassar 1,5°C, em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015; LI et al., 2020; FAGUNDES et al., 2025). Mesmo não sendo possível definir um limiar exato de ruptura das condições climáticas (TORRES et al., 2021; MARTINS et al., 2022), aumentos acima dos limiares estabelecidos na COP21, como 3°C e 4°C, poderão impactar severamente a segurança hídrica e a estabilidade hidrológica, exacerbando ainda mais os riscos para Minas Gerais (ZÁKHIA et al., 2021).

Diante desses desafios, o uso dos limiares de aquecimento em estudos climáticos é essencial, pois permite avaliar os impactos e riscos climáticos de maneira comparável e independente de trajetórias específicas de emissões de gases de efeito estufa (FAGUNDES et al., 2025). Ou seja, ao enquadrar os impactos associados a cada limiar de aquecimento (por exemplo 1,5°C a 4°C) é possível distinguir as mudanças potencialmente evitáveis e inevitáveis (FAGUNDES et al., 2025), fornecendo base sólida para apoiar as políticas de mitigação e de planejamento e adaptação em escala regional (LEMES et al., 2023).

Por essas razões, avaliar os riscos climáticos sobre a disponibilidade hídrica em Minas Gerais considerando os limiares de aquecimento global estabelecidos na COP21 (1,5°C e 2°C) e os limiares adicionais de 3°C e 4°C, é fundamental para fortalecer o planejamento hidrológico e a gestão dos recursos hídricos. Tal análise oferece subsídios

para decisões estratégicas voltadas à mitigação de vulnerabilidades e à redução de perdas econômicas, sociais e ambientais, promovendo uma abordagem mais resiliente diante das mudanças climáticas. Apesar da relevância, estudos que avaliam o impacto dos limiares de aquecimento global estabelecidos no Acordo de Paris sobre a disponibilidade hídrica regional, incluindo Minas Gerais, ainda são escassos. Até o momento, poucos estudos como os de Martins et al. (2022) e Tavares et al. (2023) investigaram os limiares de aquecimento sobre a disponibilidade hídrica com base nos limites derivados dos modelos climáticos do *Coupled Models Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Ambos os estudos, investigaram como os limiares de 1,5°C e 2°C afetam a disponibilidade hídrica para a América do Sul (MARTINS et al., 2022) e Brasil (TAVARES et al., 2023), com enfoque no setor agrícola e florestal. No entanto, ainda não foram realizadas avaliações integradas em escala regional, utilizando a mais recente geração de modelos climáticos do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) e suas projeções de alta resolução do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections* (NEX-GDDP-CMIP6). Abordar essa lacuna é especialmente importante para compreender os impactos potenciais associados aos limiares de aquecimento mais intensos, como 3°C e 4°C, aplicados aos recursos hídricos.

Embora os Modelos de Circulação Geral (MCGs) do CMIP6 forneçam informações climáticas valiosas em escala global, eles apresentam resolução espacial relativamente grosseira, variando entre 100 km e 250 km (SAMUEL et al., 2023; FAGUNDES et al., 2025). Em contrapartida, os MCGs fornecidos pelo NEX-GDDP-CMIP6, derivados dos MCGs do CMIP6, oferecem projeções climáticas com correção de viés e resolução espacial refinada (~25 km) (THRASHER et al., 2022). A maior resolução espacial torna o NEX-GDDP-CMIP6 mais adequado para análises em escala regional e local, como o proposto neste estudo, permitindo uma melhor identificação e resposta às variações climáticas específicas de cada área (THRASHER et al., 2022).

Para avaliar os impactos dos limiares de aquecimento global sobre a disponibilidade hídrica, é necessário, inicialmente, determinar os períodos e os padrões climáticos em que esses limiares ocorrem (FAGUNDES et al., 2025). Uma vez identificados, esses padrões climáticos podem ser aplicados em ferramentas de cômputo da disponibilidade hídrica, como o balanço hídrico climatológico (BHC) (MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024). Assim, ao aplicar os padrões climáticos de cada limiar de aquecimento, derivados dos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6, no BHC, é possível obter

insights mais precisos sobre a evapotranspiração real (ETR), a deficiência hídrica (DEF) e o excedente hídrico (EXC) em Minas Gerais (ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Este estudo teve como objetivo geral analisar os impactos dos limiares de aquecimento global estabelecidos no Acordo de Paris (1,5°C e 2°C) e de dois limiares adicionais (3°C e 4°C) na disponibilidade hídrica para o estado de Minas Gerais usando múltiplos modelos climáticos do NEX-GDDP-CMIP6, e identificar os padrões de variação da ETR, DEF e EXC.

2.2. Objetivos Específicos

- I. Identificar os padrões de aumento e/ou diminuição da ETR, DEF e EXC de acordo com os diferentes limiares de aquecimento global (1,5, 2, 3 e 4°C) em dois cenários socioeconômicos (SSP 2-4.5 e SSP 5-8.5).
- II. Avaliar os impactos dos limiares de aquecimento, contribuindo para a identificação de desafios e para a formulação de estratégias que favoreçam o planejamento e a adaptação diante das mudanças climáticas, do ponto de vista hídrico.
- III. Mapear sazonalmente, a DEF e EXC com o intuito de entender como ocorrerá a distribuição da disponibilidade hídrica ao longo do ano, permitindo um planejamento estratégico hídrico mais eficiente para a gestão dos recursos hídricos, mitigação de impactos de secas e enchentes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Acordo de Paris e Limiares de Aquecimento Global

A 21^a Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) resultou na formulação do Acordo de Paris, um tratado internacional voltado para a estabilização do aquecimento global em limiares considerados mais seguros pela comunidade científica, embora ainda danosos. O pacto foi assinado em 12 de dezembro de 2015 por 195 países, sendo posteriormente ratificado por 193 países com o objetivo principal de limitar o aumento da temperatura média global abaixo de 2°C, com esforços para restringi-lo a 1,5°C em relação aos níveis pré-industriais (UNFCCC, 2015). Esses limiares foram estabelecidos com base em evidências científicas que indicam que ultrapassá-los pode resultar em danos irreversíveis ao sistema climático (KING et al., 2021; ABRAMS et al., 2023).

Contudo, o desafio de manter o aquecimento global dentro desses limites tem se tornado cada vez mais difícil (VAN VLIET et al., 2012; ANDERSON, 2015; KARMALKAR; BRANDLEY, 2017). As emissões de gases de efeito estufa permanecem em níveis elevados (Figura 2), e projeções climáticas indicam que a marca de 1,5°C pode ser atingida entre 2030 e 2052, sendo ultrapassado nos anos seguintes caso não sejam implementadas medidas mais rigorosas de mitigação (IPCC, 2021). Além disso, a temperatura média global da superfície terrestre já aumentou 0,99°C (0,84–1,10°C) comparada ao período pré-industrial (IPCC, 2021).

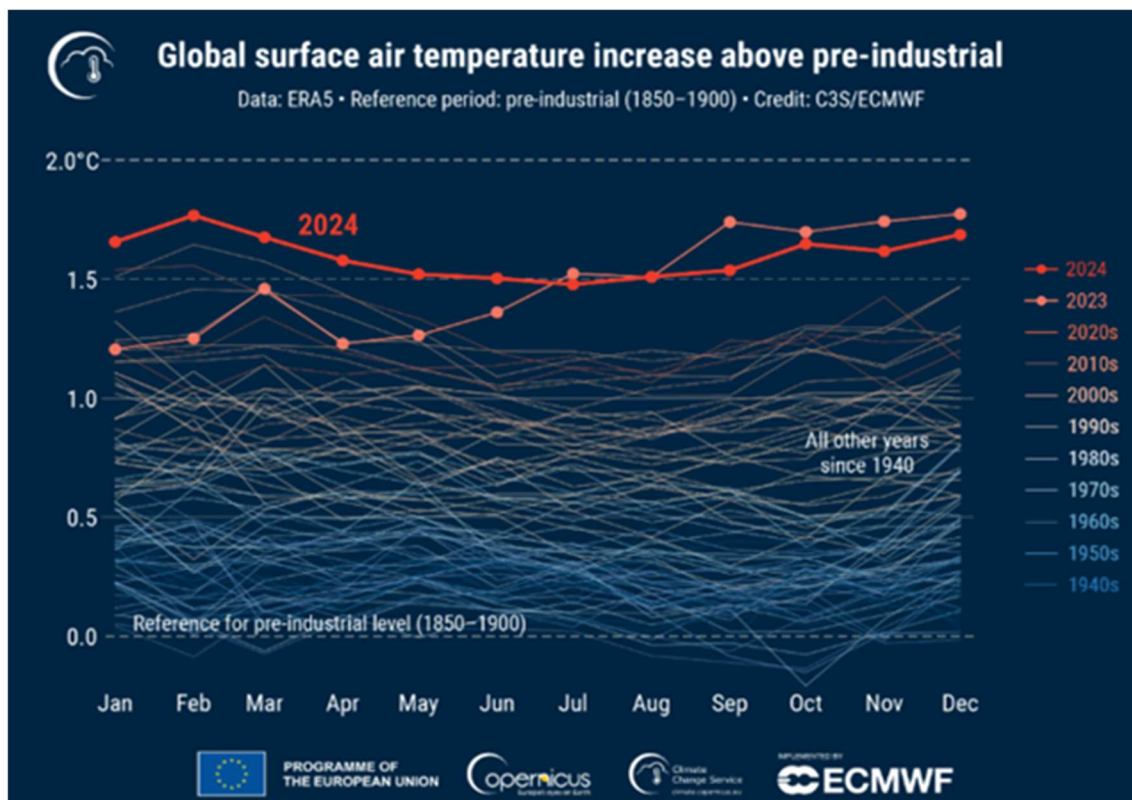


Figura 2: Aumento da temperatura do ar na superfície global acima da temperatura pré-industrial.

Fonte: Copernicus, 2025.

O *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2021) alerta que ao atingir o limiar de 1,5°C, ondas de calor, secas e tempestades intensas se tornarão mais frequentes, afetando a segurança hídrica e alimentar. Também ocorrerá perda de até 90% dos recifes de corais e o derretimento acelerado das geleiras, que elevarão o nível do mar, ameaçando cidades costeiras. Caso o aquecimento ultrapasse os 2°C, os estudos concluem que os efeitos serão ainda mais severos, como: o aumento do nível do mar poderá inundar regiões inteiras, ondas de calor extremas tornarão algumas áreas inabitáveis, e ecossistemas inteiros podem colapsar, levando à extinção em massa de diversas espécies. Além disso, crises humanitárias e conflitos por recursos naturais poderão se intensificar.

Já um aquecimento superior a 3°C ou 4°C, ultrapassando os limites do Acordo de Paris, traria consequências devastadoras e irreversíveis para os ecossistemas naturais, afetando drasticamente a biodiversidade, comprometendo a capacidade de adaptação de inúmeras espécies e colocando em risco setores econômicos essenciais, como a agricultura, os recursos hídricos e a infraestrutura urbana (MBA et al., 2018; TORRES et al., 2021; TAVARES et al., 2023; LEMES et al., 2023).

Os impactos das mudanças climáticas, no entanto, não ocorrem de maneira homogênea em todo o planeta (Figura 3). Algumas regiões são mais vulneráveis do que outras, devido a fatores como localização geográfica, condições socioeconômicas e capacidade de adaptação (BENASSI, 2020). Dessa forma, torna-se essencial não apenas limitar o aquecimento global, mas também avaliar e compreender os impactos regionais desses limiares para embasar estratégias eficazes de mitigação e adaptação.

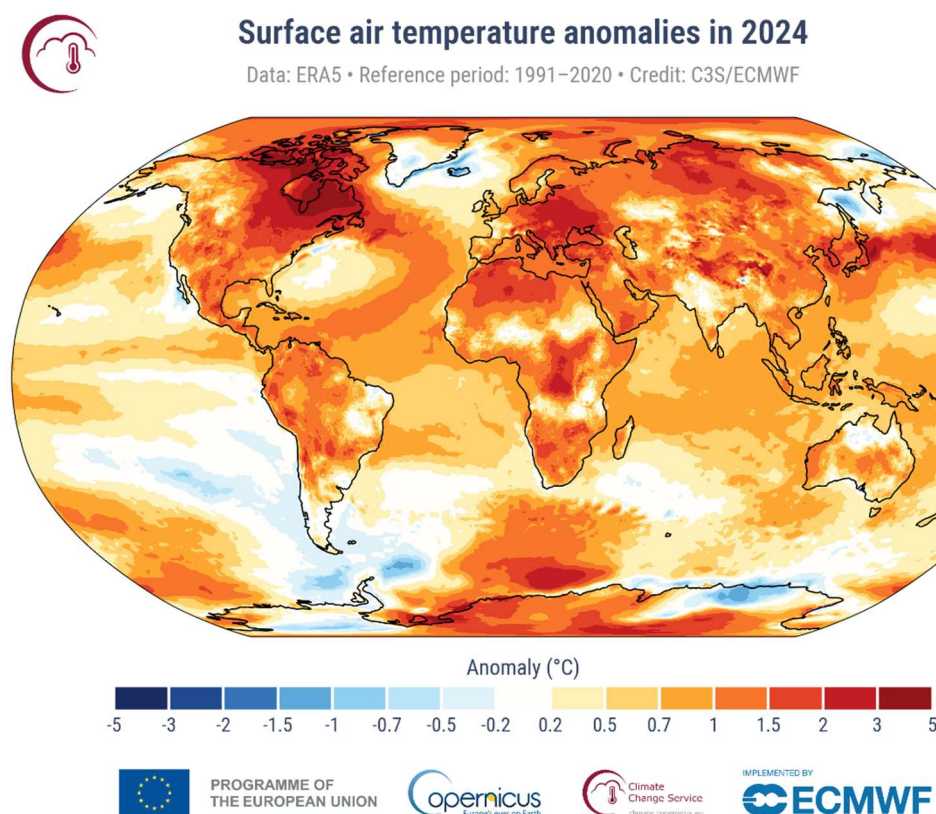


Figura 3: Anomalias na temperatura do ar na superfície em 2024.

Fonte: Copernicus, 2025.

Entretanto, os estudos apontam que os compromissos nacionais assumidos até agora não são suficientes para garantir a limitação do aquecimento dentro desses limites, exigindo esforços adicionais de descarbonização e transição energética (ROGELJ et al., 2016), ou seja, para cumprir as metas do acordo, são necessárias reduções rápidas e profundas nas emissões de gases de efeito estufa, bem como a implementação de políticas climáticas eficazes e de longo prazo (ROCKSTRÖM et al., 2017).

Embora o Acordo de Paris represente um marco na governança climática global, sua eficácia depende do compromisso contínuo dos países signatários. Historicamente, os Estados Unidos têm protagonizado movimentos de saída e retorno ao pacto: após anunciar sua retirada em 2017, o país retornou em 2021 sob a administração Biden, reforçando a importância da cooperação internacional (UNFCCC, 2015). No entanto, em 20 de janeiro

de 2025, o presidente Donald Trump assinou novamente a retirada dos EUA do acordo. Conforme as regras do Acordo de Paris, o desligamento só se concretiza cerca de um ano após a notificação oficial à ONU, de modo que a saída deverá ser efetivada apenas em 2026.

O IPCC (2021) enfatiza que cada fração de grau de aquecimento adicional intensifica eventos climáticos extremos, como ondas de calor, secas e chuvas intensas, trazendo consequências diretas para a sociedade e os ecossistemas. Assim, a viabilidade de limitar o aquecimento global a 1,5°C depende da aceleração das ações climáticas e do cumprimento rigoroso dos compromissos estabelecidos no Acordo de Paris.

3.2. Evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é um dos componentes fundamentais do balanço hídrico e do ciclo hidrológico, desempenhando um papel crucial na redistribuição da água nos ecossistemas e na gestão sustentável dos recursos hídricos. Isso porque, a ET ocorre por meio de dois processos interligados: a evaporação, que consiste na conversão direta da água líquida em vapor a partir da superfície do solo e de corpos d'água, e a transpiração, que é a liberação de vapor d'água pelas plantas através dos estômatos, durante o processo de respiração e fotossíntese (Figura 4). Esses mecanismos regulam o fluxo de água entre a biosfera e a atmosfera, influenciando diretamente o microclima e a disponibilidade hídrica (STEENHUIS & VAN DER MOLEN, 1986).



Figura 4: Exemplificação da Evapotranspiração potencial ou de referência: em condições meteorológicas padrão, com cultura de referência e solo sem restrição hídrica.

Fonte: Santos, (2022).

A importância da ET é notável tanto no ciclo da água quanto na regulação climática. Ela desempenha um papel decisivo na manutenção da umidade do solo, na formação de nuvens e precipitações e na troca de energia térmica entre a superfície terrestre e a atmosfera (RAZA et al., 2023).

A estimativa da ET é essencial para a gestão eficiente dos recursos hídricos, influenciando diretamente a agricultura, o planejamento ambiental e o monitoramento climático. Na agricultura, a estimativa da ET é fundamental para determinar a necessidade hídrica das culturas, garantindo que as plantas recebam a quantidade ideal de água para seu desenvolvimento (RADIN et al., 2003; BASTOS et al., 2008). Isso possibilita um planejamento mais preciso da irrigação, evitando o desperdício e o déficit hídrico, o que impacta diretamente a produtividade agrícola e a sustentabilidade do uso da água. Ou seja, o monitoramento da ET permite otimizar a aplicação de recursos hídricos, reduzindo custos e aumentando a eficiência dos sistemas de irrigação (COELHO et al., 2005; BORGES, 2016; RODRIGUES et al., 2021; LEITE, 2025).

A ET também desempenha um papel crucial no monitoramento dos impactos das mudanças climáticas. Como é influenciada por fatores como temperatura, umidade

relativa, radiação solar e velocidade do vento, seu estudo permite avaliar tendências de alteração no ciclo hidrológico e identificar possíveis variações na disponibilidade hídrica (SNYDER et al., 2011; ZHANG et al., 2019; IPCC, 2021). Outro aspecto importante da estimativa da ET está nos estudos sobre balanço hídrico e na gestão de bacias hidrográficas. Ao quantificar a ET, é possível compreender melhor a dinâmica da água em determinada região, auxiliando no planejamento do uso sustentável dos recursos hídricos. Pois, a ET influencia diretamente o balanço hídrico, reduzindo a água disponível para abastecimento humano, industrial e agrícola, sendo um indicador essencial quando se fala em conservação da água e na adaptação a períodos de escassez (STEENHUIS & VAN DER MOLEN, 1986).

A estimativa da ET pode ser realizada por diferentes métodos, variando em precisão e aplicabilidade. O método de Penman-Monteith, padronizado pela FAO (ALLEN et al., 1998), é amplamente utilizado na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) por considerar um conjunto abrangente de variáveis climáticas — radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento — e representar de forma física os processos que regulam a transferência de água para a atmosfera. Apesar de ser considerado o método padrão pela FAO, sua aplicação prática é frequentemente limitada pela exigência de dados meteorológicos complexos, os quais nem sempre estão disponíveis em estações meteorológicas ou modelos de circulação geral (MCG), sobretudo em países como o Brasil, onde a distribuição espacial de estações e a consistência temporal dos dados ainda apresentam lacunas significativas (MONTEIRO et al., 2021).

Métodos diretos, como lisímetros de pesagem e tanques Classe A, fornecem medições confiáveis da ET, porém demandam alta manutenção, envolvem custos elevados e são restritos a locais experimentais. Alternativamente, métodos baseados em sensoriamento remoto, como *Surface Energy Balance Algorithm for Land* (SEBAL) e *Mapping Evapotranspiration at High Resolution with Internalized Calibration* (METRIC), possibilitam estimativas de ET_o em grande escala espacial, sendo úteis para o monitoramento agrícola e a gestão de recursos hídricos (MELESSE et al., 2007). No entanto, esses métodos apresentam resolução temporal limitada, elevada complexidade técnica e podem gerar estimativas com erros significativos quando comparados a métodos físicos calibrados com dados locais.

Nesse cenário, os métodos empíricos simplificados destacam-se por sua acessibilidade e aplicabilidade em contextos de escassez de dados meteorológicos, seja em escala regional ou de grande extensão espacial. Estes métodos, como os propostos por Thornthwaite (1948), Hargreaves e Samani (1985), Turc (1961) e Abtew (1996), utilizam um número reduzido de variáveis — geralmente temperatura do ar, radiação solar e, em alguns casos, umidade relativa — o que facilita sua implementação em séries históricas longas e modelagens climáticas. Embora tradicionalmente considerados menos precisos, o estudo de Monteiro et al. (2021) demonstrou que determinados métodos empíricos, apresentaram desempenho comparável ao método de Penman-Monteith ao longo de 38 anos de dados diários em todo o território brasileiro. Além disso, sua simplicidade e compatibilidade com dados amplamente disponíveis em MCG o tornam especialmente vantajoso para aplicações operacionais, estudos de variabilidade climática e projeções futuras. Assim, os métodos empíricos, quando bem escolhidos e validados, representam uma alternativa robusta, eficiente e de baixo custo para a estimativa da ETo.

3.3. Balanço Hídrico Climatológico

O balanço hídrico climatológico (BHC) é uma ferramenta importante para a compreensão da dinâmica da água no solo em relação às condições atmosféricas de uma região. Seu principal objetivo é obter a disponibilidade hídrica ao longo do tempo, fornecendo subsídios para o planejamento agrícola, a gestão de recursos hídricos e a avaliação de riscos associados à escassez e excesso hídrico (VILLA et al., 2022).

A entrada da água no sistema ocorre por meio da precipitação, enquanto sua saída se dá pela evapotranspiração potencial (ETP) (SALES et al., 2014). O balanço entre esses fluxos determina os períodos secos e úmidos, sendo útil para caracterizar a sazonalidade climática de uma região (PARREIRA et al., 2019).

Entre os métodos utilizados para a estimativa do BHC, o mais tradicional é o proposto por Thornthwaite e Mather (1955), amplamente aplicado devido à sua simplicidade e eficácia. Este modelo utiliza dados climatológicos básicos (como: precipitação acumulada e temperatura do ar), e a capacidade de água disponível (CAD) para estimar variáveis como a ETR, DEF e o EXC. A aplicação do método pode ser feita em escala mensal, sendo útil para o manejo hídrico, o planejamento do uso do solo, a definição de práticas agrícolas adequadas e gestão hídrica (MARTIN et al., 2008; DUNNE & LEOPOLD, 1970; BLACK, 1996; BRUNO et al., 2007; SPAROVEK et al., 2006).

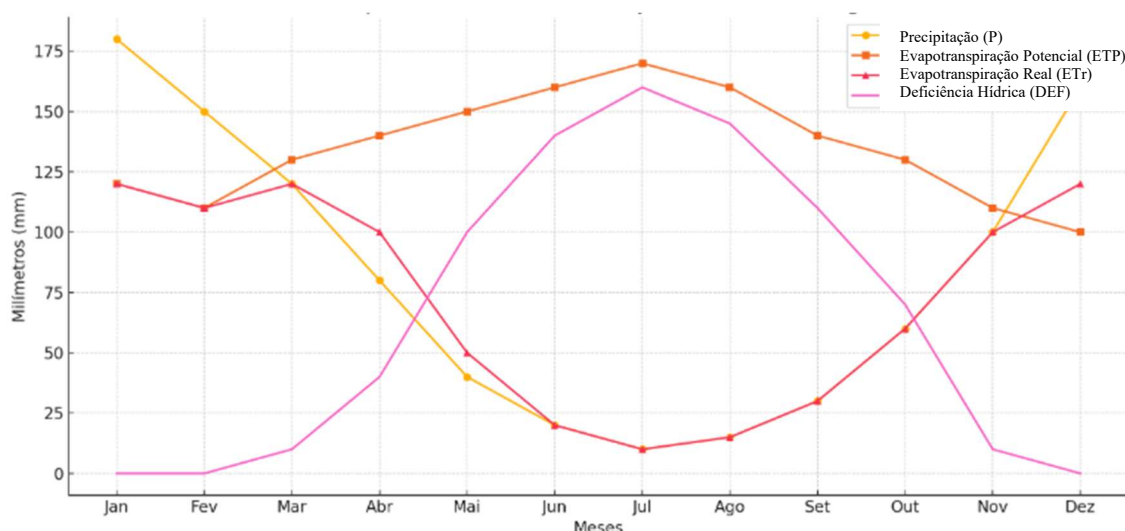


Figura 5: Exemplo do Comportamento das variáveis do BHC ao longo do ano, a partir das variáveis de precipitação (P , mm mês^{-1}), evapotranspiração potencial (ETP , mm mês^{-1}), evapotranspiração real (ETr , mm mês^{-1}) e deficiência hídrica (DEF , mm mês^{-1}).

Fonte: Autoria Própria, 2025. (Dados simulados para fins didáticos)

O cômputo do BHC também é uma ferramenta valiosa para a caracterização edafoclimática e edafológica de uma região (MARTIN et al., 2008), uma vez que permite relacionar as características do solo com as condições hídricas disponíveis para as culturas. De forma prática, o cálculo parte da suposição de que o solo está em capacidade de campo ao fim da estação chuvosa. Entretanto, em regiões semiáridas, onde esse armazenamento pode ser inferior ao ideal, ajustes metodológicos foram propostos, como a equação de Mendonça (1958), que permite estimativas mais realistas sem a necessidade de procedimentos iterativos.

Outros autores também buscaram refinar a metodologia original, adaptando-a a escalas temporais menores, como a diária, a fim de melhorar a acurácia da análise hidrológica (STEENHUIS & VAN DER MOLEN, 1986; RUSHTON et al., 2006). Essas modificações tornam o modelo mais versátil e aplicável em diversas situações de monitoramento e planejamento hídrico. Por exemplo, Dourado-Neto et al. (2010) propôs uma generalização da metodologia tradicional, permitindo iniciar o balanço hídrico de maneira mais simplificada, mesmo em regiões com múltiplos períodos secos, o que otimiza o cálculo e amplia o uso do modelo sob diferentes condições climáticas.

No Brasil, a Agência Nacional de Águas (ANA) é responsável por atualizar periodicamente o balanço hídrico das bacias hidrográficas do país (PINHATI, SOUZA & VILLELA, 2017).

3.4. Segurança Hídrica: Escassez Hídrica e Excesso Hídrico

A segurança hídrica tem se consolidado como um conceito fundamental no campo da gestão dos recursos hídricos, especialmente diante das transformações ambientais globais, do crescimento populacional e da intensificação dos eventos climáticos extremos (MELO & JOHNSON et al., 2017).

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), a segurança hídrica é definida como a capacidade de uma população em “salvaguardar o acesso sustentável a quantidades adequadas de água de qualidade para garantir a sobrevivência, o bem-estar humano, o desenvolvimento socioeconômico; assegurar proteção contra poluição e desastres relacionados à água; e preservar ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política” (UN-WATER, 2013). Essa abordagem abrange dimensões sociais, ambientais e institucionais, com ênfase na necessidade de uma gestão integrada e colaborativa. De forma análoga, outros autores reforçam que o cerne do conceito reside no duplo desafio de garantir o acesso sustentável à água para todos os usos e, simultaneamente, proteger a sociedade dos riscos de escassez e excesso hídrico (MELO & JOHNSON et al., 2017).

A escassez hídrica é um dos principais desafios à segurança hídrica e pode ter origem física, econômica ou institucional. O relatório da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2012) “Gerenciando a água em situações de incerteza e risco” define a escassez hídrica não apenas como uma limitação quantitativa, mas como um problema ampliado por dificuldades de acesso, e projeta que o aumento da demanda global agravará esse cenário em diversas regiões até 2030. Frente a esse cenário, a segurança hídrica é vista como um processo dinâmico de adaptação e de construção de resiliência, exigindo o fortalecimento da governança e o planejamento baseado em riscos e incertezas.

A *Global Water Partnership* (GWP) (2014) reforça que a segurança hídrica envolve garantir a disponibilidade confiável de água para usos múltiplos, considerando tanto aspectos de quantidade quanto de qualidade. No Brasil, a crise hídrica de 2014, especialmente na região Sudeste, evidenciou a fragilidade dos sistemas de gestão frente a períodos prolongados de escassez, levando à elaboração do Plano Nacional de Segurança Hídrica (PNSH) (MELO & JOHNSON et al., 2017).

O PNSH é uma iniciativa estratégica do governo brasileiro, com objetivo de garantir a disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas, promovendo ações estruturantes e investimentos prioritários em áreas vulneráveis. A PNSH incorpora o conceito de segurança hídrica como base para o desenvolvimento sustentável, priorizando regiões com maiores riscos de desabastecimento e impacto socioeconômico

(PNSH, 2019). Para orientar suas diretrizes, a política utiliza índices de segurança hídrica (Figura 6), que consideram variáveis como demanda e oferta de água, qualidade, regularização por infraestrutura e vulnerabilidade climática (PNSH, 2019). Esses índices permitem identificar áreas críticas e planejar intervenções com base em evidências técnicas, integrando ações de infraestrutura hídrica, governança, gestão por bacias hidrográficas e proteção ambiental.

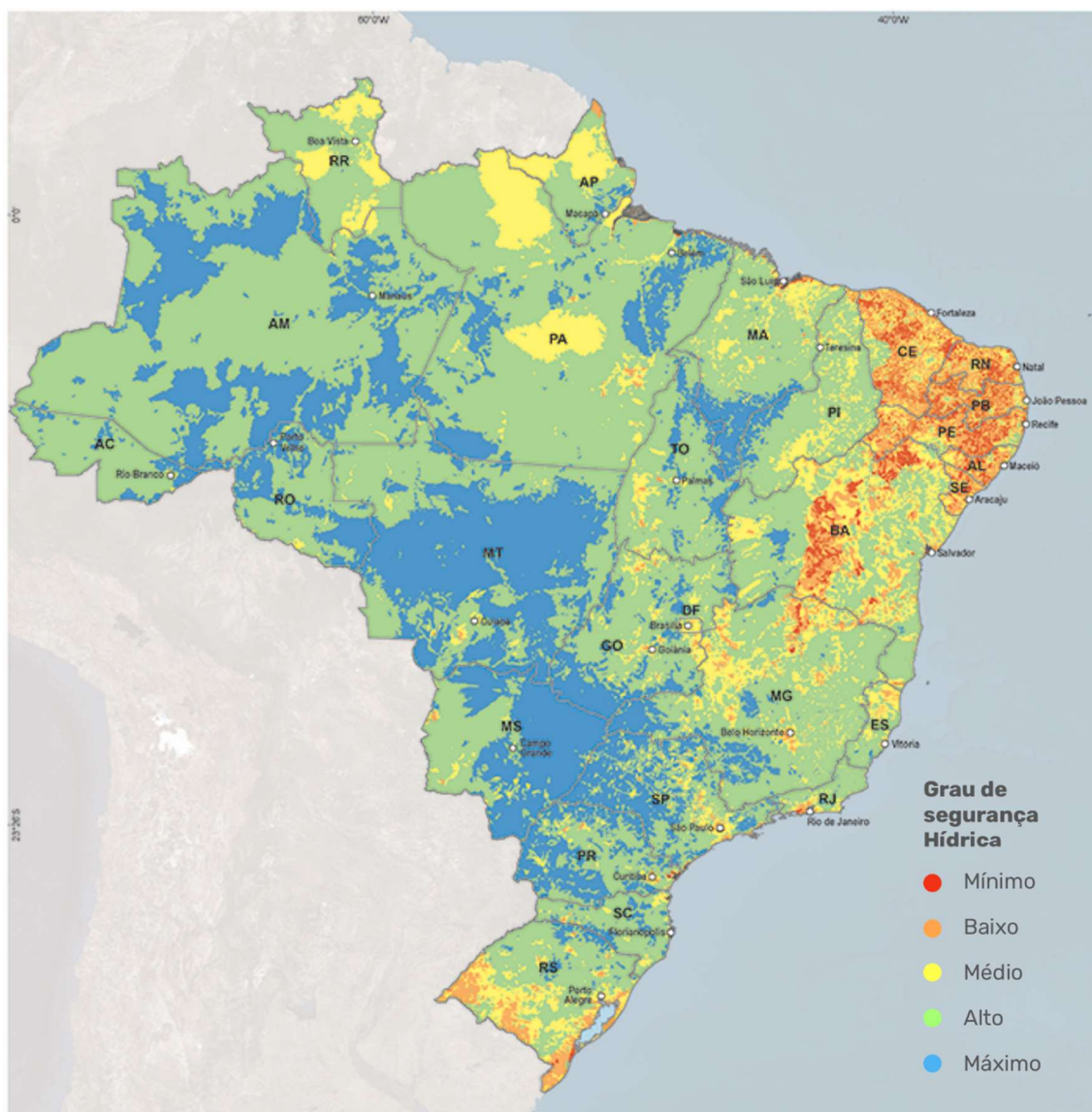


Figura 6: Índice de Segurança Hídrica (ISN) - Cenário 2035.

Fonte: PNSH, (2021).

Paralelamente à escassez, o excesso hídrico também representa uma ameaça à segurança hídrica. Eventos como inundações, deslizamentos de terra e enchentes vêm se intensificando devido às mudanças climáticas, à urbanização desordenada e à degradação dos ecossistemas naturais. Isso porque, segundo a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, 2013), o conceito de segurança hídrica deve

incluir também a gestão dos riscos associados ao excesso de água, de forma a proteger vidas humanas, infraestrutura e economias.

A *UN-Water* (2013) aponta que o excesso de água pode comprometer o bem-estar social e econômico de comunidades inteiras, especialmente em regiões vulneráveis. A abordagem de risco proposta por entidades internacionais sugere o uso de instrumentos de planejamento que permitam antecipar, mitigar e responder aos impactos desses eventos, por meio de sistemas de alerta precoce, infraestrutura resiliente e governança eficaz.

Dessa forma, nota-se que a segurança hídrica é um conceito multifacetado, que abrange tanto a garantia de abastecimento hídrico quanto a mitigação de riscos associados à escassez e ao excesso. A ONU, a UNESCO, a OCDE e a GWP convergem na defesa de uma abordagem integrada, baseada na gestão por bacia hidrográfica, na cooperação entre os setores e na adoção de métricas que permitam mensurar o grau de segurança hídrica em diferentes contextos (UN-WATER, 2013; UNESCO, 2012; GWP, 2014).

4. DADOS E METODOLOGIA

4.1. Área de Estudo

Minas Gerais, localizado na região Sudeste do Brasil (Figura 1A), possui uma extensão territorial de ~586.528 km², abrangendo áreas de baixa altitude, como o Vale do Rio Doce (~200 m), até regiões de alta altitude, como o Pico da Bandeira (2.892 m) localizado na Serra da Mantiqueira. O estado está situado entre as latitudes 14°13' S e 22°54' S e longitudes 39°51' W e 51°02' W (Figura 1B).

Com relação as características climáticas, Minas Gerais está inserido no regime de Monção da América do Sul, o que determina duas estações bem definidas: um verão quente e chuvoso e um inverno frio e seco. Nesse regime, a maior parte da precipitação ocorre de meados da primavera a meados do outono (REBOITA et al, 2018), acompanhando o ciclo sazonal do SAMS. Esse ciclo inicia-se no final de setembro, com o avanço da convecção da Amazônia em direção ao centro do Brasil, intensifica-se no verão com forte atividade convectiva associada à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e entra em declínio a partir de março, quando as chuvas diminuem e retornam gradualmente para a região equatorial. (GARCIA et al., 2015;).

No que diz respeito à demanda por recursos hídricos, Minas Gerais apresenta um padrão setorial diverso e bem definido, com o setor agropecuário respondendo por 54,3% do consumo total, seguido pelo uso urbano-doméstico (20,5%) e pelas atividades industriais e de mineração (25,2%) (TUCCI et al., 2017).

4.2. Dados Climáticos

Este estudo analisou simulações e projeções climáticas a partir de um conjunto de 30 modelos climáticos (MCGs) disponíveis no NEX-GDDP-CMIP6 (Tabela 1) para cada ponto de grade de Minas Gerais (Figura 1B). Os dados do NEX-GDDP-CMIP6 derivam do CMIP6 e são fornecidos pelo *Climate Analytics Group* e *NASA Ames Research Center* e disponibilizados pelo *NASA Center for Climate Simulation* (NCCS) em: <https://www.nccs.nasa.gov/services/data-collections/land-based-products/nex-gddp-cmip6>. Os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 possuem resolução horizontal de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude x longitude).

Foram utilizados dados mensais de temperatura média do ar (T_{as} , $^\circ\text{C}$) e precipitação acumulada (P , $\text{mm m\acute{e}s}^{-1}$) a partir de um conjunto de simulações para o período de referência (PR, 1995-2014) e projeções (2015-2100) (Tabela 1). Aqui, é importante deixar claro que os MCGs do CMIP6 possuem simulações para o período histórico entre 1850 - 2014, enquanto os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 possuem simulações para 1950 - 2014, e ambos os conjuntos possuem projeções para 2015 - 2100. Ou seja, somente os MCGs do CMIP6 possuem simulações para o período pré-industrial (1850-1900), considerado o de menor influência antropogênica em relação a qualquer outro período (IPCC, 2021; FAGUNDES et al., 2025). Dado que os MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 não possuem simulações para o período pré-industrial, e o objetivo é analisar anomalias relativas a um PR, adotou-se o intervalo de 1995–2014. Esta escolha alinha-se à prática do IPCC AR6 e é comum em estudos de impacto climático (IPCC, 2021).

Tabela 1: Lista dos Modelos de Circulação Geral (MCGs) do conjunto de dados do *NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Climate Projections* (NEX-GDDP-CMIP6) utilizados neste estudo.

Modelos MCG	Centro desenvolvedor
ACCESS-CM2	<i>Australian Community Climate and Earth</i>
ACCESS-ESM1-5	<i>System Simulator</i> (Austrália)
BCC-CSM2-MR	<i>Beijing Climate Center, China Meteorological</i> <i>Administration</i> (China)
CanESM5	<i>Canadian Centre for Climate Modelling and</i> <i>Analysis</i> (Canadá)
CESM2	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
CESM2-WACCM	(Estados Unidos)
CMCC-ESM2	<i>Centro Euro-Mediterraneo sui Cambiamenti</i> <i>Climatici</i> (Itália)
CNRM-CM6-1	<i>Centre National de Recherches</i>
CNRM-ESM2-1	<i>Meteorologiques</i> (França)
EC-Earth3	<i>EC-Earth Consortium</i> (Europa)
EC-Earth3-Veg-LR	
FGOALS-g3	<i>Chinese Academy of Sciences, Institute of</i> <i>Atmospheric Physics</i> (China)
GFDL-CM4	<i>Geophysical Fluid Dynamics Laboratory</i>
GFDL-ESM4	(Estados Unidos)
GISS-E2-1-G	<i>NASA Goddard Institute for Space Studies</i> (Estados Unidos)
HadGEM3-GC31-LL	<i>Met Office Hadley Centre</i> (Reino Unido)
IITM-ESM*	<i>Indian Institute of Tropical Meteorology</i> (Índia)
INM-CM4-8	<i>Institute for Numerical Mathematics</i> (Rússia)

INM-CM5-0	
IPSL-CM6A-LR	<i>Institut Pierre-Simon Laplace (França)</i>
KACE-1-0-G	<i>Korea Institute of Atmospheric Prediction</i>
KIOST-ESM	<i>Systems (Coreia do Sul)</i>
MIROC-ES2L	<i>Atmosphere and Ocean Research Institute/</i>
	<i>National Institute for Environmental Studies/</i>
MIROC6	<i>Japan Agency for Marine-Earth Science and</i>
	<i>Technology (Japão)</i>
MPI-ESM1-2-HR	<i>Max Planck Institute for Meteorology</i>
MPI-ESM1-2-LR	<i>(Alemanha)</i>
MRI-ESM2-0	<i>Meteorological Research Institute (Japão)</i>
NESM3	<i>Nanjing University of Information Science and</i>
	<i>Technology (China)</i>
NorESM2-LM	
	<i>Norwegian Climate Centre (Noruega)</i>
NorESM2-MM	

As projeções do NEX-GDDP-CMIP6 incorporam cinco cenários de emissões, integrando os *Shared Socioeconomic Pathways* (SSPs) (RIAHI et al., 2017), que descrevem diferentes trajetórias de desenvolvimento socioeconômico, com os *Representative Concentration Pathways* (RCPs) (VAN VUUREN et al., 2011), que representam trajetórias de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera. Nesse estudo, foi utilizado dois SSPs: o SSP2-4.5 (denominado ‘middle of the road’) e SSP5-8.5 (denominado ‘fossil-fueled development’). O SSP2-4.5 é um cenário intermediário que considera a hipótese de um desenvolvimento socioeconômico onde as taxas de emissão em relação aos níveis pré-industriais ficam estagnadas, levando a um forçamento radiativo de 4,5 W m⁻² em 2100 (RIAHI et al., 2017). Já o SSP5-8.5 é um cenário pessimista onde se assume que a mitigação será negligenciada, implicando em um cenário socioeconômico baseado em fontes de energia de combustíveis fósseis, que assume um aumento no forçamento radiativo de 8,5 W m⁻² até ao final do século XXI (RIAHI et al., 2017).

4.3. Dados Edáficos

Os dados edáficos de capacidade de retenção de água no solo (CRAS, mm cm^{-1}) foram obtidos por meio de dados de textura do solo fornecidos pela NASA *Global Land Data Assimilation System Version 2* (GLDAS-2) através do portal *Land Data Assimilation System* (LDAS) (<https://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas/soils>). Os dados de textura do solo apresentam resolução horizontal similar aos MCGs, ou seja, $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ (latitude x longitude), permitindo uma representação espacial detalhada das características do solo. Esses dados abrangem as 12 classes de textura definidas pela FAO, além de informações sobre matéria orgânica, rocha e outros componentes (DIAS et al., 2024; FAGUNDES et al., 2025). As classes texturais incluem: Areia, Areia Franca, Franco Arenoso, Franco Siltoso, Silte, Franco, Franco Argilo Arenoso, Franco Argilo Siltoso, Franco Argiloso, Argila Arenosa, Argila Siltosa e Argila. Tais classes texturais foram agrupadas em 3 (três) grupos principais, a fim de representar os diferentes valores de CRAS (DIAS et al., 2024; RIBEIRO et al., 2024): i) solo predominantemente argiloso com alta CRAS ($1,50 \text{ mm cm}^{-1}$), ii) solo predominantemente franco com média CRAS ($1,00 \text{ mm cm}^{-1}$) e iii) solo predominantemente arenoso com baixa CRAS ($0,60 \text{ mm cm}^{-1}$).

4.4. Passos para identificar os anos de aquecimento e para calcular o balanço hídrico climatológico (BHC)

Fagundes et al. (2025) estabeleceram períodos de aquecimento de $1,5^\circ\text{C}$, 2°C , 3°C e 4°C , em relação aos níveis pré-industriais, para todo o globo, e analisaram os padrões espaciais mensais de temperatura e precipitação durante o período de ocorrência para os quatro limiares de aquecimento. Neste estudo, utilizamos as conclusões de Fagundes et al. (2025) para calcular o BHC para Minas Gerais. Ou seja, seguimos a metodologia descrita por Samuel et al. (2023) e aplicamos diretamente os períodos de ocorrência dos limiares de aquecimento global ($1,5^\circ\text{C}$, 2°C , 3°C e 4°C) identificados por Fagundes et al. (2025), sempre em relação ao período pré-industrial (1850–1900). Primeiro, Fagundes et al. (2025) calculou os valores de temperatura média anual abrangendo todas as simulações e projeções dos MCG do CMIP6 (1850 a 2100). Em seguida, com esses valores médios anuais, foi obtida a média climatológica de temperatura do período pré-industrial para cada MCG e SSP. Em seguida, foi calculada uma série de anomalias, subtraindo o valor anual de cada MCG de sua respectiva climatologia pré-industrial. Para remover a variabilidade climática em escalas inferiores a 21 anos, Fagundes et al. (2025)

aplicou um filtro de média móvel centrado em 21 anos à série de anomalias, produzindo séries de anomalias anuais suavizadas para o período de 1860 a 2090. Para identificar os respectivos anos de aumento da temperatura global em 1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C, o estudo de Fagundes et al. (2025), calculou uma média espacial global a partir da série de anomalias anuais suavizadas de cada MCG e SSP, empregando o comando ‘fldmean’ do Climate Data Operators (CDO) (<https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo/>).

Para a análise espacial, Fagundes et al. (2025) determinou uma média de todas as projeções disponíveis dentro de cada SSP, utilizando a série anual de anomalias suavizadas para cada MCG no ano identificado para atingir os limiares de aquecimento global (1,5°C a 4°C), e por fim, a média (ensemble mean) das projeções para os dois SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5).

Também foram analisados os padrões para a precipitação, uma vez que essa variável é fundamental para o BHC. Para isso, Fagundes et al. (2025) utilizou o mesmo procedimento descrito acima, exceto o cálculo da média global, desnecessário para esta variável (TORRES et al., 2021).

Os anos correspondentes a cada MCG do CMIP6 foram identificados e associados diretamente aos respectivos MCGs do NEX-GDDP-CMIP6 por Fagundes et al. (2025). A representação esquemática das etapas metodológicas para determinar o ano em que serão atingidos os limiares de aquecimento de 1,5°C a 4°C pode ser visualizado na Figura 7.

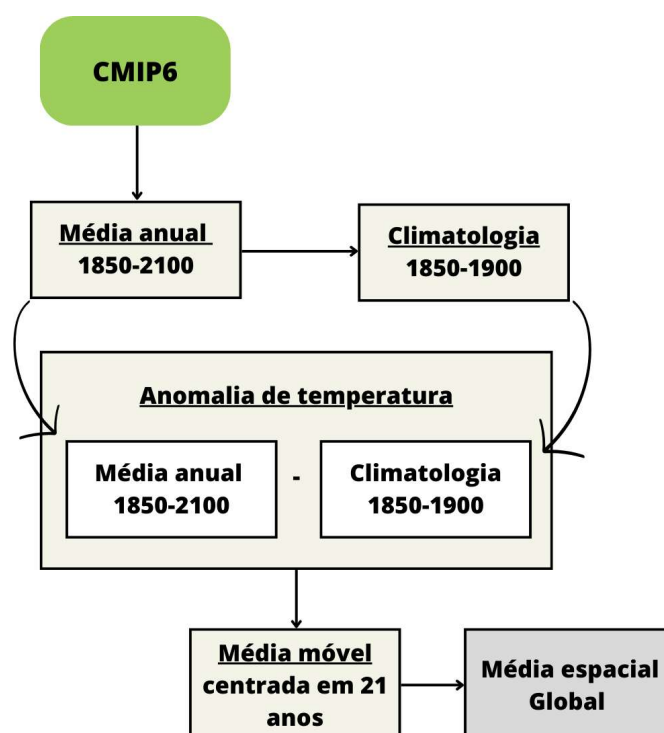


Figura 7: Representação esquemática da metodologia para a identificação do ano em que se projeta atingir o aquecimento médio global de 1,5°C, 2°C, 3°C, e 4°C.

Fonte: Adaptado de Fagundes et al. (2025).

O BHC foi calculado para dois períodos distintos: (i) o período de referência (PR, entre 1995 e 2014), utilizado como base para comparação; e (ii) os períodos em que as projeções atingem cada um dos quatro limiares de aquecimento global (1,5°C à 4°C), a partir do conjunto de dados do NEX-GDDP-CMIP6.

O BHC foi calculado usando a versão do método de Thornthwaite e Mather (1955, 1957) adaptada por Dourado-Neto et al. (2010). Apesar deste método exigir poucos dados de entrada (P e Evapotranspiração Potencial [ETP, mês^{-1}]), ele é amplamente utilizado porque fornece estimativas precisas e coerentes dos componentes do BHC, ou seja, valores de evapotranspiração real (ETR), deficiência (DEF) e excedente hídrico (EXC), em escala mensal e em diferentes condições climáticas (clima árido, semiárido e úmido) (DOURADO-NETO et al., 2010; ALVES et al., 2020; MARTINS et al., 2022). Ou seja, este método de BHC representa de forma coerente o armazenamento de água no solo em locais com mais de uma estação seca por ano (DIAS et al., 2024; RIBEIRO et al., 2024), o que é comum em vários locais de Minas Gerais (RIBEIRO et al., 2024).

Esse método requer um conjunto reduzido de dados de entrada, composto pelos acumulados mensais climatológicos de precipitação e evapotranspiração potencial (ETP), ambos expressos em mm mês^{-1} . Esses dados foram utilizados para os períodos i e ii, juntamente com o cálculo da capacidade de água disponível no solo (CAD, mm). Para sintetizar os resultados e minimizar as incertezas associadas à variabilidade interna dos GCMs e aos dois cenários SSP, empregou-se a média (ensemble mean) das variáveis P e ETP considerando todos os modelos climáticos globais e os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5 do conjunto NEX-GDDP-CMIP6. As etapas metodológicas do cálculo do BHC estão apresentadas na Figura 8.

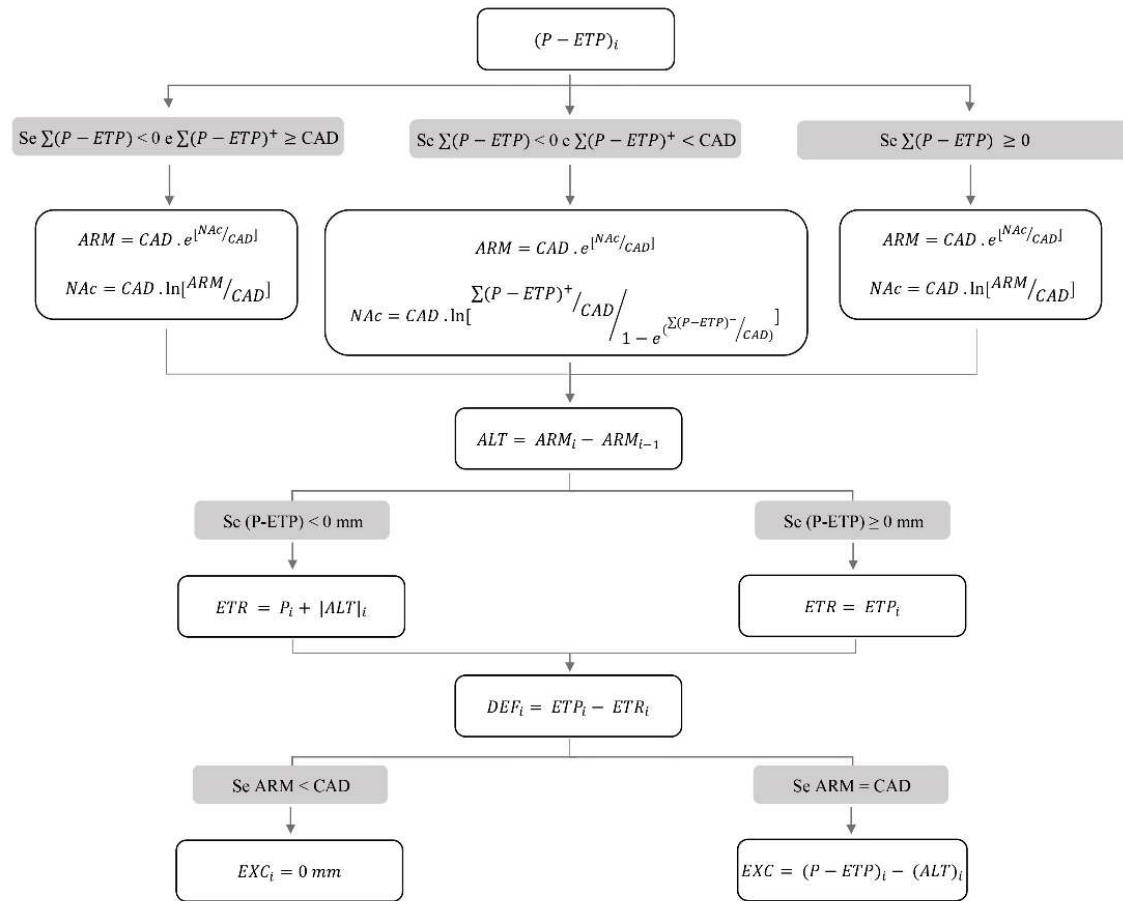


Figura 8: Passo a passo de cômputo do balanço hídrico climatológico (BHC) para obter evapotranspiração real (ETR, mm mês⁻¹), deficiência hídrica (DEF, mm mês⁻¹) e excedente hídrico (EXC, mm mês⁻¹). CAD = capacidade de água disponível no solo (mm); ETP = evapotranspiração potencial (mm mês⁻¹); P = precipitação (mm mês⁻¹); NAc = negativo acumulado (mm mês⁻¹); ARM = armazenamento de água no solo (mm); ALT = alteração do armazenamento (mm mês⁻¹) entre os períodos i e i-1; +=soma dos valores positivos mensais de P-ETP (estação chuvosa); -=soma dos valores negativos mensais de P-ETP (estação seca); i se refere ao mês do ano (1= janeiro, 2 = fevereiro, ..., 12 = dezembro).

Fonte: A autoria Própria, 2025, adaptado de Alves et al. (2020) e Martins et al. (2022).

A ETP mensal (Eq. 1) foi estimada pela versão modificada do método de Thornthwaite (1948) proposta por Willmott et al. (1985), que aplica ajustes para temperatura média mensal do ar ($\geq 26,5$ °C), fotoperíodo e duração do mês (MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024). Embora este método utilize apenas a T_{as} , ele fornece estimativas confiáveis de ETP em escala mensal e longas séries temporais (OUDIN et al., 2005; MARTINS et al., 2022; RIBEIRO et al., 2024). Portanto, é um método ideal para aplicações de ETP em escala regional, sendo amplamente usado para estudos de BHC em climas futuros (ALVES et al., 2020, MARTINS et al. 2022, RIBEIRO et al. 2024).

As etapas de cálculo da ETP estão descritas nas equações 1 a 6.

$$ETP_x = \begin{cases} 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Tas}{I}\right)^a & \text{se } 0 \leq Tas \leq 26,5^\circ\text{C} \\ -415,85 + 32,24 \cdot Tas - 0,43 \cdot Tas^2 & \text{se } Tas > 26,5^\circ\text{C} \end{cases} \quad (1)$$

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 \cdot Tas)^{1,514} \quad (2)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (3)$$

$$N = \frac{2}{15} \cdot \arcsin[-1 \cdot (\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta)] \quad (4)$$

$$C_i = \frac{N}{12} \cdot \frac{NDP_i}{30} \quad (5)$$

$$ETP = ETP_x \cdot C_i \quad (6)$$

Em que: ETP_x é a evapotranspiração potencial não corrigida para o i -ésimo mês considerado ($i = 1$, janeiro à 12, dezembro) (mm mês^{-1}); ETP é a evapotranspiração potencial corrigida para o i -ésimo mês considerado (mm mês^{-1}); Tas é a média climatológica da temperatura média do ar do i -ésimo mês ($^\circ\text{C}$); I é o índice anual de calor; a é o índice térmico regional; C_i é o fator de correção; NDP_i é o número de dias do i -ésimo mês; N_i é o fotoperíodo do 15º dia do i -ésimo mês, considerado representativo da média mensal; φ é a latitude e δ_i é a declinação solar do 15º dia do i -ésimo mês, os quais foram obtidos para cada ponto de grade de Minas Gerais (Figura 1B).

A CAD foi obtida pelo produto entre o comprimento do perfil do solo, fixado em 100 cm — valor recomendado em estudos climatológicos que avaliam DEF e EXC em escala regional, sem foco em culturas específicas (ALVES et al., 2020) — e a CRAS (detalhada no item 4.3). Com isso, adotaram-se os seguintes valores de CAD: 150 mm para solos predominantemente argilosos, 100 mm para solos predominantemente francos e 60 mm para solos predominantemente arenosos.

4.5. Impactos dos limiares de aquecimento global no BHC

Os impactos dos quatro limiares de aquecimento global foram analisados a partir da representação dos padrões espaciais dos valores do extrato do BHC, em termos da ETR, DEF e EXC, obtidos nos dois períodos analisados (i e ii), e pela anomalia, ou seja, a diferença dos valores obtidos (ETR, DEF e EXC) entre o período em que os quatro limiares foram atingidos e o PR (1995 - 2014).

Além disso, foi realizada a análise espacial dos padrões sazonais de DEF e EXC para capturar variações de ambas as variáveis no verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON). Esse enfoque permite identificar períodos críticos de

vulnerabilidade, nos quais a escassez ou o excesso de água pode impactar setores essenciais, como o agrícola, o de recursos hídricos, o energético e o de infraestrutura urbana. Dessa forma, a abordagem adotada oferece uma compreensão mais detalhada dos impactos dos diferentes limiares de aquecimento global (1,5°C a 4°C) na disponibilidade hídrica de Minas Gerais e reforça a urgência de medidas de adaptação e mitigação para reduzir esses impactos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise dos padrões da temperatura e precipitação associados aos períodos de aquecimento em Minas Gerais

A partir dos achados de Fagundes et al. (2025), verificou-se que o limiar de 1,5°C está projetado para ocorrer em 2028 (2031), o de 2°C em 2041 (2051), o de 3°C em 2063 (2072) e o de 4°C em 2072 (2084), considerando os cenários SSP5-8.5 (SSP2-4.5). De modo geral, observa-se que o SSP2-4.5 está associado a projeções em que os limiares de aquecimento global são atingidos mais tardiamente e de forma menos intensa comparado ao SSP5-8.5 (ANEXO 1). Tal padrão é esperado uma vez que os SSP2-4.5 e SSP5-8.5, apresentam diferenças em forçamento radiativo e concentrações de gases de efeito estufa (GEE). O SSP5-8.5 é um cenário em que há aumentos mais severos das emissões de GEEs e temperatura até ao final do século XXI, contrário do SSP2-4.5 em que há um aumento até meados do século XXI (~2050), e após esse período o aquecimento se estabiliza (RIAHI et al., 2017).

Vale ressaltar que no cenário SSP2-4.5 o modelo CanESM5 foi o único a atingir o nível de aquecimento global de 4°C (em 2084). Esse modelo apresenta uma sensibilidade climática de equilíbrio particularmente elevada, ou seja, prevê taxas de aquecimento global mais elevadas do que os outros modelos com o mesmo forçamento externo (SWART et al., 2019).

A análise dos padrões espaciais de temperatura em Minas Gerais (Figura 9) revela projeções semelhantes entre os limiares de aquecimento e entre os SSPs. Em outras palavras, a distribuição espacial da temperatura para os quatro limiares (1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C) mostra alta consistência entre SSP2-4.5 e SSP5-8.5, indicando que a trajetória de emissões e a intensidade das forçantes radiativas exercem pouca influência na configuração espacial das mudanças em cada limiar (FAGUNDES et al., 2025). De modo geral, nos limiares de 1,5°C, 2°C e 3°C, observa-se um aquecimento adicional de aproximadamente +0,5 °C no Triângulo Mineiro e no Noroeste de Minas. Nos limiares de 2 °C e 3 °C, essa área de aquecimento se expande para leste, abrangendo também o noroeste do Sul/Sudeste Mineiro, parte oeste do Oeste de Minas, a Região Central e o oeste do Norte de Minas. No limiar de 4 °C, praticamente todo o estado apresenta aquecimento dessa magnitude. As regiões que aquecem mais rapidamente em Minas Gerais coincidem com aquelas onde estudos anteriores, baseados em projeções dos modelos climáticos do CMIP5 (por exemplo, TORRES et al., 2021; FLORENCIO et al.,

2022; TAVARES et al., 2023) e do CMIP6 (DIAS et al., 2024; RIBEIRO et al., 2024), já haviam identificado mudanças mais pronunciadas nos padrões de temperatura. Além disso, pesquisas que analisam temperatura e precipitação destacam o Oeste e o centro-oeste de Minas Gerais como áreas críticas persistentes das mudanças climáticas em diferentes cenários de forçamento dos conjuntos CMIP5 e CMIP6 (TORRES et al., 2021; DARELA et al., 2016; RIBEIRO et al., 2024).

Com relação aos padrões espaciais de alteração na precipitação anual acumulada, observa-se que os limiares de 1,5°C e 2°C apresentam grande similaridade, com anomalias predominantemente negativas entre -25 e -100 mm ano⁻¹ nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5, concentradas sobretudo no nordeste de Minas Gerais — incluindo os Vales do Jequitinhonha, Mucuri, Vale do Rio Doce e o norte da Zona da Mata. No limiar de 3°C para o cenário SSP2-4.5, as mudanças são menos intensas do que nos limiares de 1,5°C e 2°C, com grande parte do estado variando entre -25 e 25 mm ano⁻¹, exceto no oeste de Minas, onde as reduções alcançam entre -25 e -100 mm ano⁻¹. No limiar de 4°C no SSP5-8.5, verifica-se que a mudança na precipitação é de -125 a 25 mm ano⁻¹ e áreas extensas apresentando variações entre -25 e 25 mm ano⁻¹, especialmente em uma faixa que se estende do norte ao sul do estado.

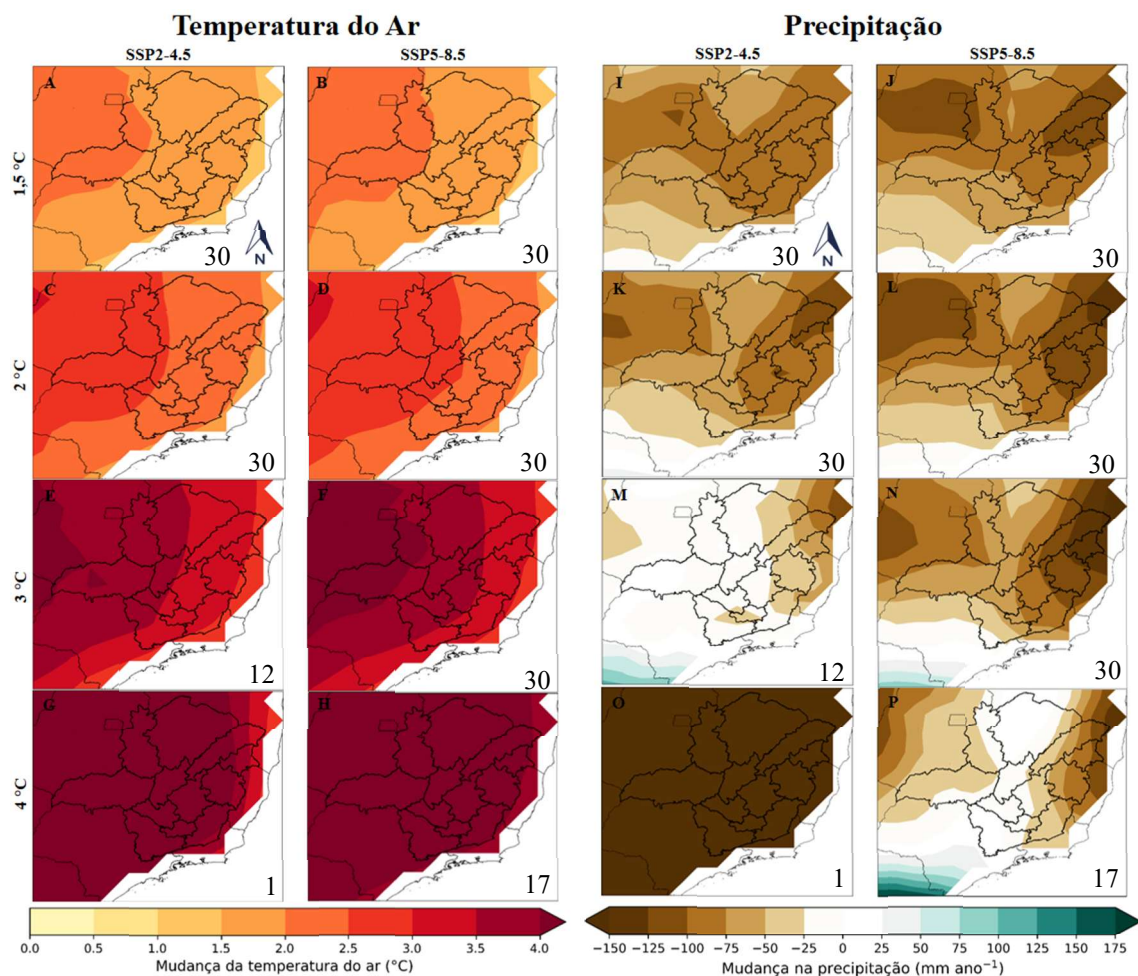


Figura 9: Padrão médio do ensemble mean da temperatura do ar próximo à superfície (°C) e da precipitação acumulada anual (mm ano^{-1}) para os limiares de aquecimento de 1,5°C (Painéis A, B, I e J), 2°C (Painéis C, D, K e L), 3°C (Painéis E, F, M e N) e 4°C (Painéis G, H, O e P) em relação ao período pré-industrial (1850-1900), nos dois cenários socioeconômicos (SSPs): SSP2-4.5 (Painéis A, C, E, G, I, K, M e O) e SSP5-8.5 (Painéis B, D, F, H, J, L, N e P). O número de modelos usados para calcular a média é indicado no canto inferior direito de cada painel.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

5.2. Balanço hídrico climatológico sobre os quatro limiares de aquecimento

Para as variáveis do BHC, ETR, DEF e EXC, foi realizada uma análise média em cada SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), excluindo o MCG CanESM5 no SSP2-4.5 no limiar de 4°C. Essa abordagem minimiza a dependência de um único modelo e reduz as incertezas de ter resultados isolados.

Os padrões espaciais dos valores anuais das variáveis ETR, DEF e EXC, para o estado de Minas Gerais, nos quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) assim como as anomalias em relação ao PR (1995-2014) são mostrados na Figura 10 para o SSP2-4.5 e na Figura 11 para o SSP5-8.5. Os padrões de cada variável são bastante semelhantes entre os SSPs, exceto por uma ligeira intensificação em área e

magnitude em algumas regiões no SSP5-8.5 (Figura 11). De maneira geral, os padrões espaciais de ETR e DEF refletem o padrão observado para a temperatura do ar (Figura 9 A - H), enquanto para o EXC se alinha aos padrões de precipitação anual (Figura 9 I - P). Ou seja, nos locais onde há padrões de aquecimento mais rápidos e intensos, há aumentos na ETR e DEF, enquanto nos locais onde há padrões de redução da precipitação anual, há diminuição do EXC. Tais respostas demonstram que a temperatura do ar é uma variável determinante para a saída de água para a atmosfera.

Em ambos os cenários analisados (SSP2-4.5 e SSP5-8.5), há uma intensificação progressiva das variáveis ETR, DEF e redução do EXC à medida que os limiares de aquecimento global são atingidos. Essa intensificação é particularmente expressiva nas variáveis de DEF e EXC, refletindo uma crescente instabilidade nos padrões de disponibilidade hídrica para Minas Gerais. A comparação entre os SSPs (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) revela que, independentemente do caminho socioeconômico considerado, a tendência é de agravamento da deficiência hídrica, sobretudo na região norte de Minas Gerais, onde se observa maior sensibilidade às mudanças. A principal distinção entre os cenários está na intensidade e extensão geográfica dos impactos, sendo o SSP5-8.5 notoriamente mais severo. Tal padrão reforça a relação direta entre a magnitude do aquecimento global e a amplificação dos efeitos sobre a disponibilidade hídrica.

Em relação à variável ETR (Figuras 10 e 11), as maiores magnitudes ($>1100 \text{ mm ano}^{-1}$) ocorrem no Sul/Sudoeste de Minas, sul da Zona da Mata, Triângulo Mineiro e Alto do Paranaíba. Além disso, as áreas com anomalias positivas de ETR (entre $\sim +50 \text{ mm ano}^{-1}$ e $> +250 \text{ mm ano}^{-1}$) aumentam entre os cenários (SSP2-4.5 e SSP5-8.5) e os limiares de aquecimento global de $1,5^{\circ}\text{C}$ a 4°C (Figura 10 M, P e S e Figura 11 P, S, V e Y), principalmente nas mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campo das Vertentes, Zona da Mata, Oeste de Minas, Triângulo Mineiro, Metropolitana de Belo Horizonte, Central Mineira, sul do Jequitinhonha, oeste do Vale do Rio Doce, Noroeste de Minas, e sul e oeste do Norte de Minas. Já anomalias negativas de ETR (entre $\sim -50 \text{ mm ano}^{-1}$ e $\sim -250 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas no norte do Jequitinhonha e leste do Vale do Mucuri, principalmente no SSP5-8.5 (Figura 11 P, S, V e Y).

Em relação a DEF, observa-se um aumento entre $\sim 100 \text{ mm ano}^{-1}$ no sul de Minas Gerais (nas mesorregiões sul/sudoeste de Minas, Campo das Vertentes e Oeste de Minas) e $>1100 \text{ mm ano}^{-1}$ no norte de Minas (Figura 10 N, Q e T e Figura 11 Q, T, W e Z) em ambos SSPs, com aumento da magnitude e área entre os limiares de aquecimento global ($1,5^{\circ}\text{C}$ a 4°C). Há um aumento das áreas com DEF entre $+50 \text{ mm ano}^{-1}$ (limiar de $1,5^{\circ}\text{C}$)

até $> +450 \text{ mm ano}^{-1}$ (limiar de 4°C). De forma geral, os maiores valores de DEF ($> +300 \text{ mm ano}^{-1}$) são observados na maior parte de Minas Gerais, principalmente no Vale do Rio Doce, Vale do Muruci, Jequitinhonha, Norte de Minas, Noroeste de Minas, Central Mineira e Triângulo Mineiro (Figura 10 N, Q e T e Figura 11 Q, T, W e Z). Em contrapartida, pequenas áreas no extremo sul da mesorregião Sul de Minas não apresentam alterações de DEF em todos os quatro limiares de aquecimento.

Por fim, em relação ao EXC, é possível observar diminuição (entre 100 mm ano^{-1} a 1000 mm ano^{-1}) em magnitude e área a cada aumento no limiar de aquecimento de $1,5^{\circ}\text{C}$ para 4°C (Figuras 10 C, F, I e L e Figuras 11 C, F, I, L e O). Anomalias negativas de maiores magnitudes ($> -150 \text{ mm ano}^{-1}$) são observadas nas mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Zona da Mata, Campo das Vertentes, Oeste de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, Central Mineira, Triângulo Mineiro, Noroeste de Minas, sul/oeste do Norte de Minas, sul do Jequitinhonha e oeste do Vale do Rio Doce (Figura 11 X e AA).

Ao analisar conjuntamente as variáveis ETR, DEF e EXC, é possível observar 4 padrões de acoplamento nos quatro limiares de aquecimento global, os quais são intensificados nos limiares de 3 e 4°C . O primeiro padrão ocorre em locais com os maiores aumentos de DEF ($> +300 \text{ mm ano}^{-1}$), observado no Triângulo Mineiro, Central de Minas, Noroeste de Minas e sul e oeste do Norte de Minas (Figura 10 N, Q e T e Figura 11 Q, T, W e Z). Esse padrão é explicado pela redução da Pr (entre -25 e -75 mm ano^{-1}) e EXC (entre $\sim -100 \text{ mm ano}^{-1}$ a -250 mm ano^{-1}) e aumentos na Tas entre 2°C (limiar de $1,5^{\circ}\text{C}$) até 4°C (limiar de 4°C) (Figura 9), e ETR (entre $+100$ a $+250 \text{ mm ano}^{-1}$) (Figura 10 M, P e S e Figura 11 P, S, V e Y).

O segundo padrão é observado nas mesorregiões norte e nordeste do Norte de Minas, centro do Vale Jequitinhonha, centro-oeste do Vale Muruci, e partes do Vale do Rio Doce as quais apresentam aumento da DEF ($+300 \text{ mm ano}^{-1}$), porém sem mudanças na ETR e EXC (Figuras 10 e 11). Esse padrão pode ser explicado pela redução da Pr (entre -100 a -150 mm ano^{-1}) e aumentos de Tas entre $1,5^{\circ}\text{C}$ (limiar de $1,5^{\circ}\text{C}$) até 4°C (limiar de 4°C) (Figura 9).

O terceiro padrão se refere a locais com aumento da DEF em $+300 \text{ mm ano}^{-1}$, como o nordeste do Vale de Jequitinhonha e o leste do Vale Muruci, os quais apresentam redução da ETR (entre -50 a 200 mm ano^{-1}) e Pr (entre -100 a -150 mm ano^{-1}), aumento da Tas entre $1,5^{\circ}\text{C}$ (limiar de $1,5^{\circ}\text{C}$) a 4°C (limiar de 4°C) (Figura 9), porém sem alterações no EXC.

O quarto padrão refere-se aos locais com pouca ou nenhuma alteração na DEF (menor que -50 mm ano^{-1}), como o Sul/Sudoeste de Minas, Campo das Vertentes, Oeste Mineira e sul da Metropolitana de Belo Horizonte. Nesses locais, os aumentos de ETR entre $+50 \text{ mm ano}^{-1}$ a $+250 \text{ mm ano}^{-1}$ e diminuições do EXC entre -50 mm ano^{-1} a -250 mm ano^{-1} são compensados pela menor diminuição da Pr (até -50 mm ano^{-1}) e menores aumentos de Tas (Figura 9).

Tais padrões espaciais acoplados indicam intensificação do estresse hídrico, especialmente nas regiões Norte, Noroeste de Minas e Vale do Jequitinhonha, resultando em maiores pressões sobre os sistemas de abastecimento hídrico. No Triângulo Mineiro, Central de Minas, Noroeste de Minas e nas porções sul e oeste do Norte de Minas, a redução do EXC e os aumentos da ETR poderão comprometer a recarga dos aquíferos, além de reduzir os volumes disponíveis em mananciais e reservatórios. Esses impactos amplificam o risco de comprometimento do abastecimento humano e industrial, e podem intensificar a competição por água entre os setores agrícola, urbano e energético (MARIANI et. al, 2016).

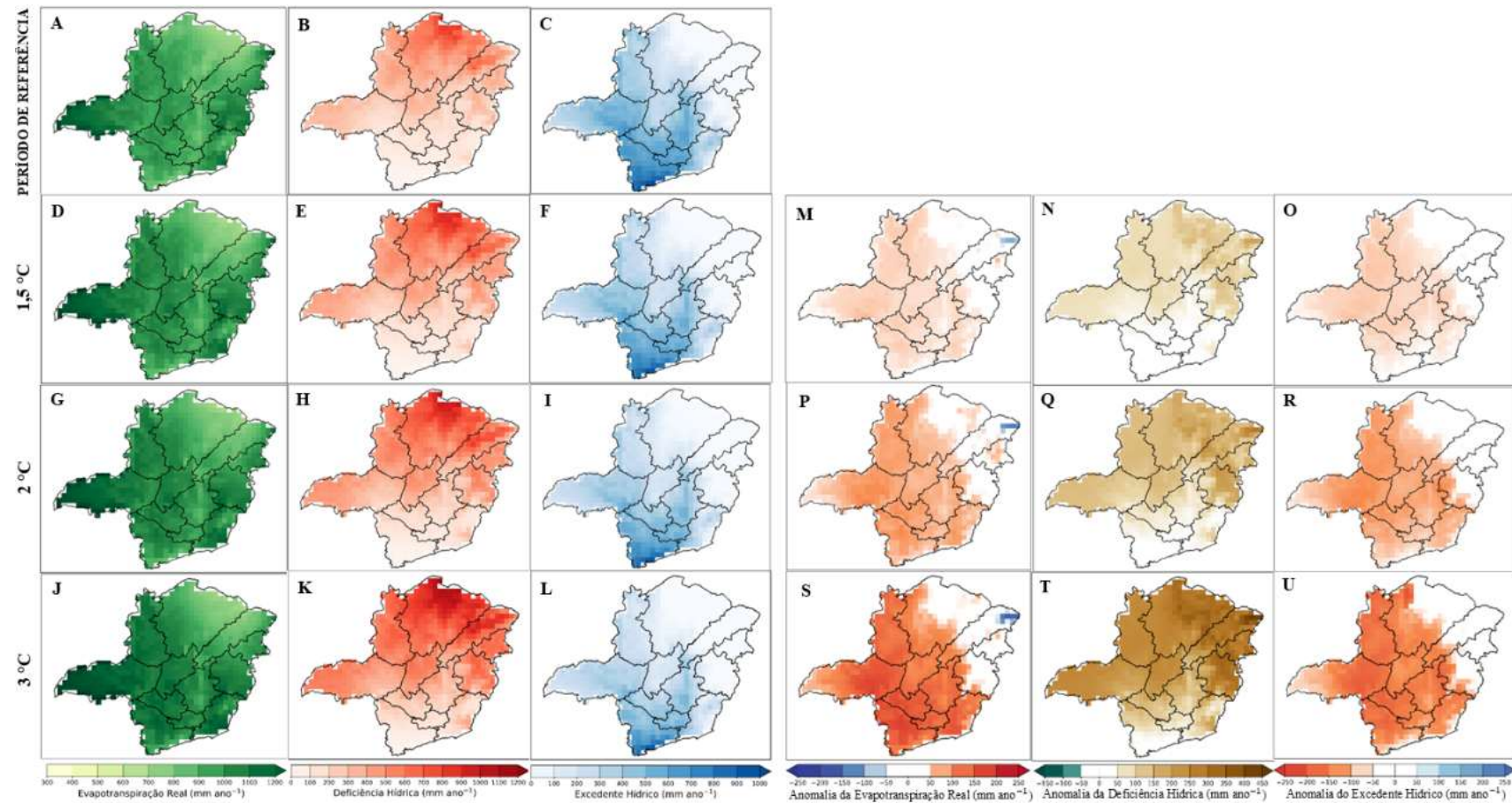


Figura 10: Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração real (ETR; mm ano⁻¹, painéis A, D, G, J), deficiência hídrica (DEF; mm ano⁻¹, painéis B, E, H, K) e excedente hídrico (EXC; mm ano⁻¹, painéis C, F, I, L) para o período de referência (1995–2014) e para três limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C e 3°C). São apresentadas também as anomalias anuais de ETR (painéis M, P, S), DEF (painéis N, Q, T) e EXC (painéis O, R, U) em relação ao período de referência (PR = 1995-2014), considerando o cenário socioeconômico SSP2-4.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

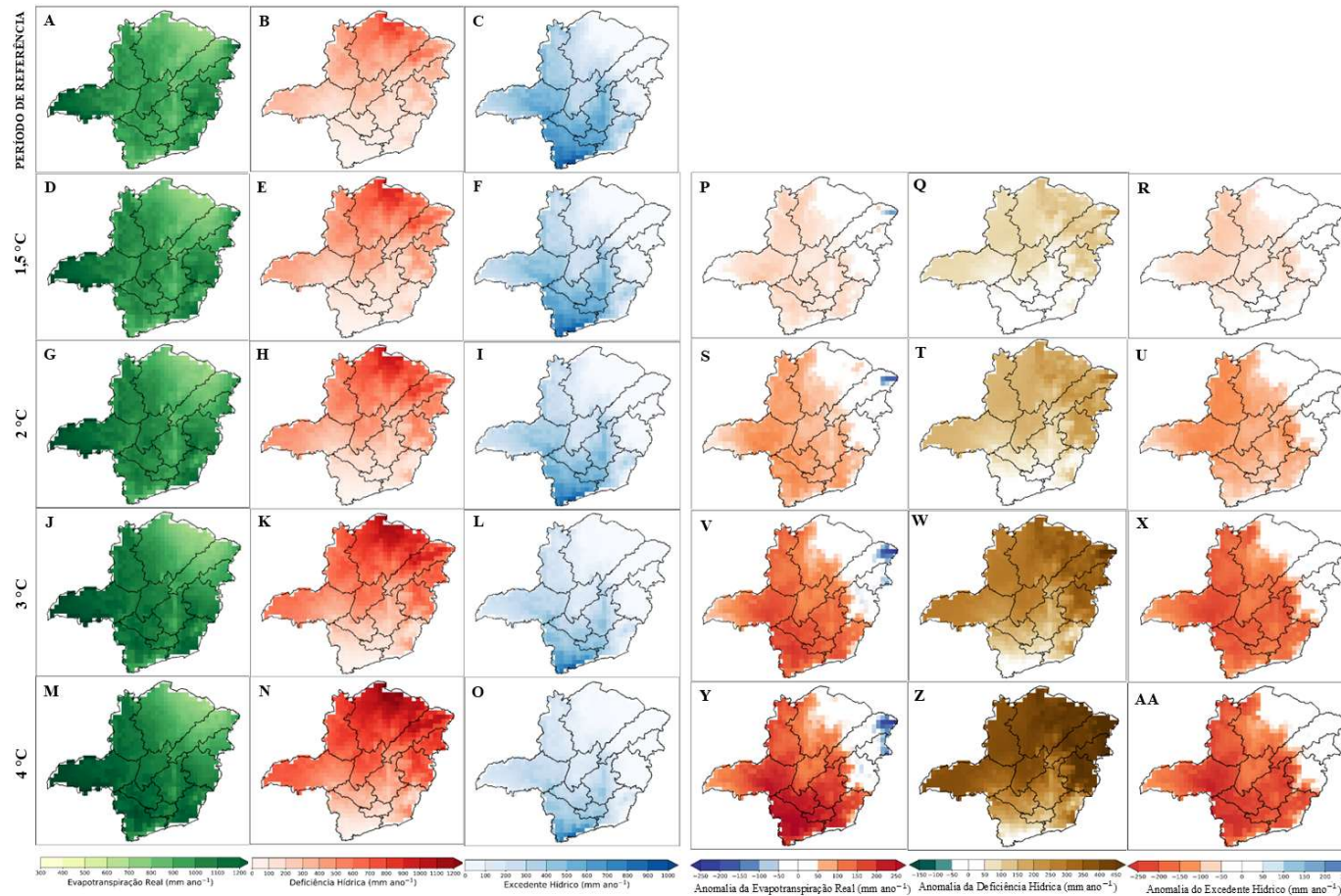


Figura 11: Padrões espaciais dos valores anuais de evapotranspiração real (ETR; mm ano⁻¹, painéis A, D, G, J e M), deficiência hídrica (DEF; mm ano⁻¹, painéis B, E, H, K e N) e excedente hídrico (EXC; mm ano⁻¹, painéis C, F, I, L e O) para o período de referência (1995–2014) e para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C, 2°C, 3°C e 4°C). São apresentadas também as anomalias anuais de ETR (painéis P, S, V e Y), DEF (painéis Q, T, W e Z) e EXC (painéis R, U, X e AA) em relação ao período de referência (PR = 1995-2014), considerando o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Nesse contexto, a análise sazonal do BHC, através do DEF e do EXC, é fundamental para a gestão integrada dos recursos hídricos. A identificação dos períodos de DEF possibilita avaliar a necessidade de irrigação e dimensionar sistemas de abastecimento, enquanto a quantificação do EXC auxilia no entendimento da recarga de aquíferos e no dimensionamento de reservatórios para controle de cheias. Dessa forma, mais do que um simples monitoramento climático, a avaliação sazonal do DEF e do EXC constitui uma ferramenta estratégica para o planejamento de infraestrutura hídrica e a mitigação de riscos, assegurando maior eficiência e sustentabilidade no uso dos recursos.

Dessa forma, a avaliação sazonal das variáveis DEF e EXC revela padrões distintos entre as estações chuvosa (primavera-verão) e seca (outono-inverno), os quais se intensificam em magnitude e extensão (em área) da vulnerabilidade nos limiares de aquecimento global mais elevados (3 °C e 4 °C). Entre os SSPs os padrões são semelhantes, exceto pela maior intensificação no SSP5-8.5 (Figura 14 e 15).

Com relação à DEF, há um aumento da deficiência no outono março-abril-maio (MAM) e inverno junho-julho-agosto (JJA), entre 50 e > 400 mm ano⁻¹, principalmente no Triângulo Mineiro, Central Mineira, Noroeste de Minas e Norte de Minas (Figuras 12 e 14) e na primavera setembro-outubro-novembro (SON) (DEF > 100 mm ano⁻¹) no nordeste de Minas Gerais, principalmente nas mesorregiões leste do Norte de Minas, Vales do Jequitinhonha e Muruci e Vale do Rio Doce. No verão dezembro-janeiro-fevereiro (DJF), praticamente não há alteração da DEF, que pode ser explicada pela pequena alteração (entre -25 a 25 mm ano⁻¹) da Pr na faixa que se estende do Sul/Sudoeste de Minas até o sul da Central Mineira (Figura 9).

Em relação ao EXC, é possível observar aumento ao longo da primavera e verão, entre 25 a ~200 mm ano⁻¹, nos quatro limiares, sendo menor no limiar de 4°C. Ou seja, há uma ligeira tendência de redução do EXC com o aumento do limiar de aquecimento. As mesorregiões com maiores reduções são: Noroeste de Minas, Triângulo Mineiro, Central Mineira, Metropolitana de Belo Horizonte, Oeste de Minas, Zona da Mata e noroeste do Sul/Sudeste de Minas (Figuras 13 e 15). Em contrapartida, praticamente não há variação do EXC no outono e inverno. Ou seja, o aquecimento global tende a aumentar o EXC na estação chuvosa de Minas Gerais (primavera e verão) e intensificar a DEF nas estações seca (outono e inverno), podendo enfraquecer ou atrasar o início da estação chuvosa, conforme já observado por Geirinhas et al. (2021) e Bottino et al. (2024).

Este comportamento confirma o aumento na demanda evaporativa da atmosfera, com o aumento da ETR (Figuras 10 e 11) e menor reposição de água no solo pela Pr,

sobretudo durante a estação seca (outono e inverno), elevando o risco de escassez hídrica e exigindo estratégias eficazes de gestão de recursos hídricos, principalmente para as mesorregiões do Triângulo Mineiro, Central Mineira, Noroeste de Minas e Norte de Minas, estas últimas já são historicamente vulneráveis à seca (CRUZ et. al, 2019).

A mesorregião Sul/Sudoeste de Minas apresenta menores aumentos na DEF e, mesmo possui pequena redução do EXC, sendo, portanto, uma das áreas menos afetadas pela escassez hídrica. Entretanto, à medida que o limiar de aquecimento aumenta e atinge os limiares de 3 °C e 4°C, observa-se maior redução do EXC, especialmente durante DJF (estação chuvosa), com valores podendo atingir ~100–150 mm ano⁻¹. Essa tendência indica que, embora a mesorregião Sul/Sudoeste seja relativamente mais resiliente do ponto de vista hidrológico, não está imune aos impactos da intensificação da seca prolongada e ou o atraso do início da estação chuvosa, especialmente sob limiares mais intensos de aquecimento (3°C e 4°C).

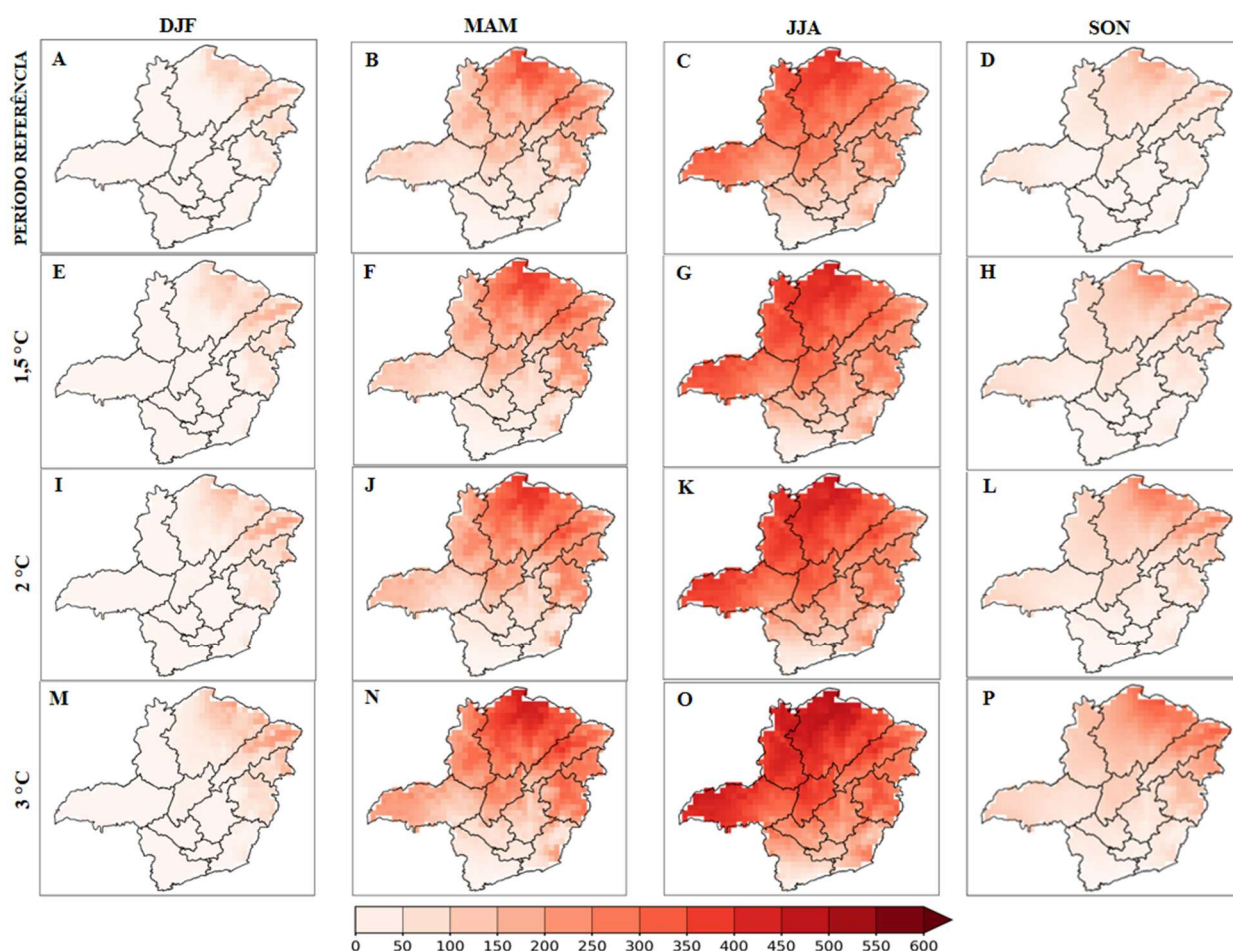


Figura 12: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹)

¹⁾ para três limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C e 3°C) para o cenário socioeconômico SSP2-4.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

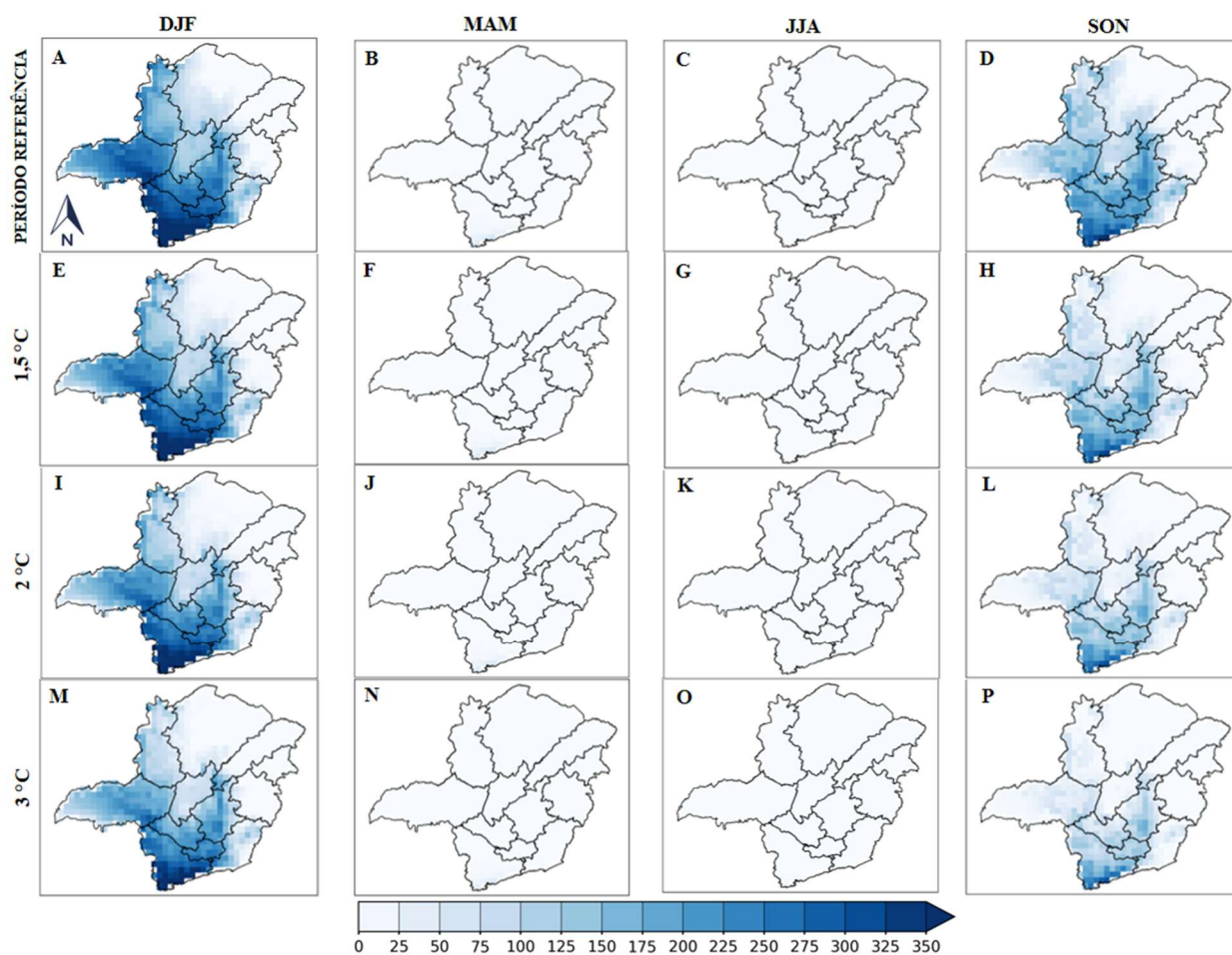


Figura 13: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹) para três limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C e 3°C) para o cenário socioeconômico SSP2-4.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

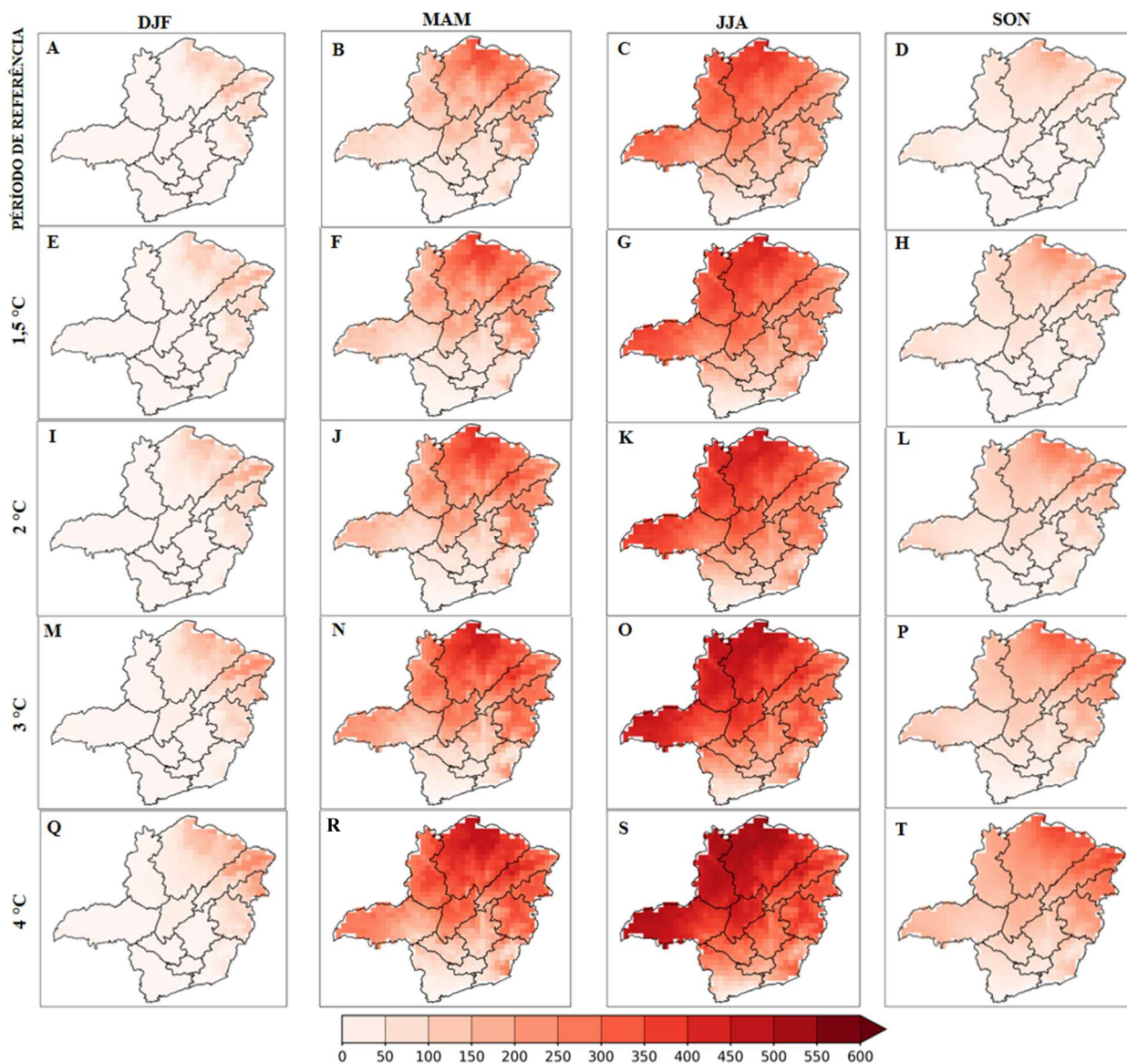


Figura 14: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de deficiência hídrica (DEF, mm ano⁻¹) para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

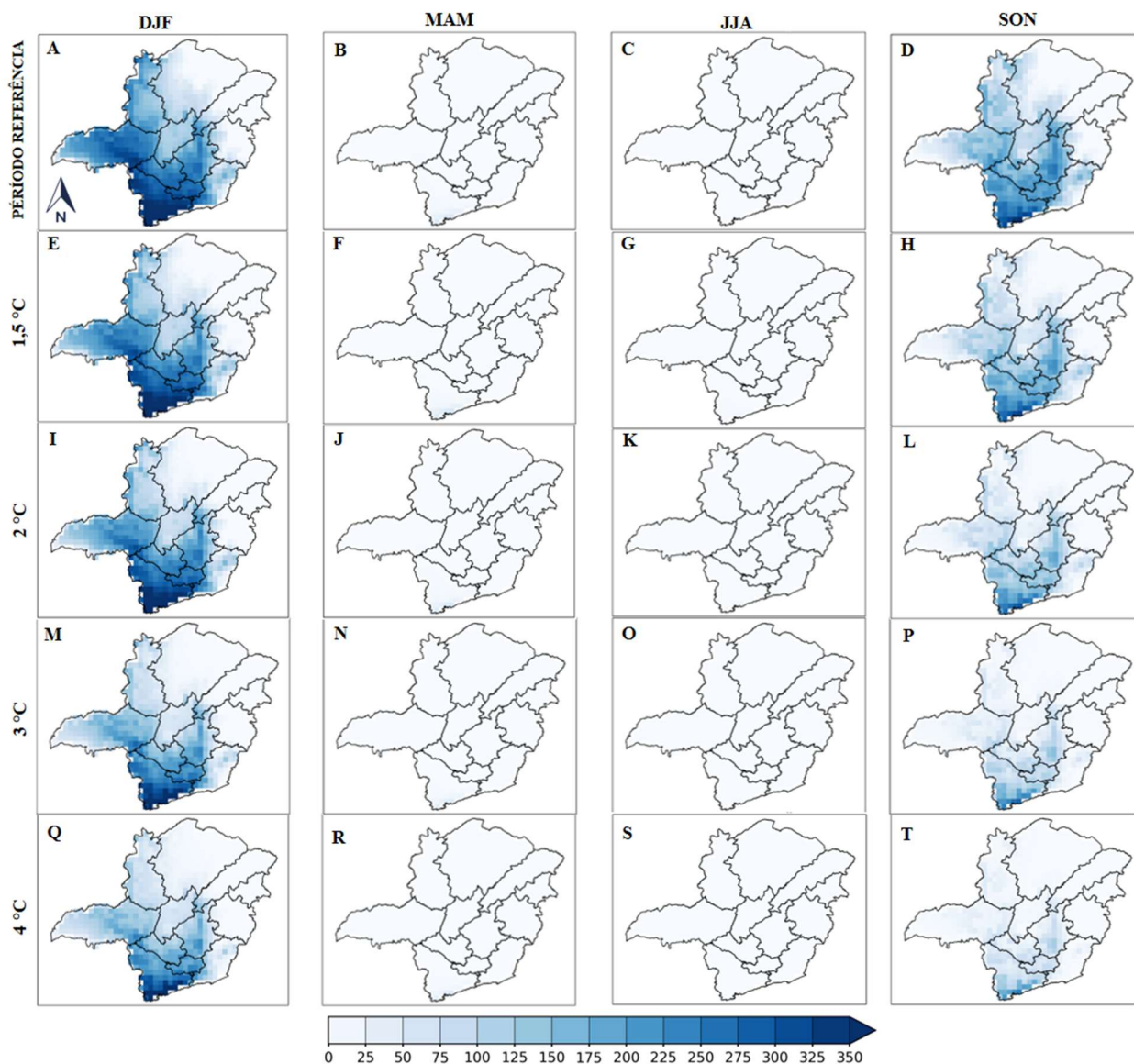


Figura 15: Padrões espaciais dos valores sazonais (dezembro-janeiro-fevereiro [DJF] – verão; março-abril-maio [MAM] – outono; junho-julho-agosto [JJA] – inverno; setembro-outubro-novembro [SON] – primavera) de excedente hídrico (EXC, mm ano⁻¹) para quatro limiares de aquecimento global (1,5°C; 2°C; 3°C e 4°C) para o cenário socioeconômico SSP5-8.5.

Fonte: Autoria Própria, 2025.

Os resultados obtidos para as variáveis do BHC (ETR, DEF e EXC) evidenciam que o aquecimento global impulsiona alterações no regime hídrico em Minas Gerais, especialmente sob os limiares mais elevados de aquecimento (3°C e 4°C). De modo geral, a intensificação das anomalias está fortemente associada ao aumento da Tas, que eleva a demanda evaporativa da atmosfera e, conseqüentemente, potencializa a ETR e o DEF. Além disso, os resultados encontrados neste estudo corroboram com os estudos de Sanches et al. (2017), Santos et al. (2017), Silva et al. (2022) e Ribeiro et al. (2024) sobre a disponibilidade hídrica em Minas Gerais com MCG do CMIP5 e CMIP6.

As regiões Norte, Noroeste de Minas e Jequitinhonha são caracterizadas pela maior sensibilidade climática, devido aos maiores aumentos da DEF ($> 600 \text{ mm ano}^{-1}$), especialmente nos limiares de aquecimento global mais elevados (3°C e 4°C) (Figura 11Q e N), associados à redução do EXC, que combinados, refletem diretamente sobre a ETR. Nessas áreas, a menor disponibilidade hídrica, associada à redução da Pr, limita a capacidade do sistema em suprir a crescente demanda evaporativa imposta pelo aumento da temperatura do ar. Como consequência, há alterações majoritárias de redução da ETR, contrastando com a tendência de elevação da ETP. Esse padrão evidencia a condição de vulnerabilidade hídrica típica de ambientes semiáridos, nos quais a escassez de água no solo restringe fortemente o processo de evapotranspiração (CRUZ et. al, 2019; RIBEIRO et al., 2024).

Vale destacar que a mesorregião Noroeste de Minas possui relevância estratégica na produção de grãos, abrigando municípios como Paracatu e Unaí, com extensas áreas irrigadas por pivô central (SOUZA et. al, 2022). O aumento da DEF durante a estação seca, especialmente em anos de seca prolongada, intensifica a competição pelo uso da água, gerando conflitos entre produtores rurais e comunidades ribeirinhas (FERREIRA et al., 2025). Esses aspectos evidenciam que os impactos hidrológicos não se limitam à escassez de água, mas se estendem às dimensões socioeconômicas, exigindo políticas de gestão hídrica integradas, planejamento da irrigação mais eficiente e monitoramento contínuo dos recursos hídricos (FERREIRA et al., 2025).

Por outro lado, as mesorregiões como o Sul/Sudoeste de Minas e parte da Zona da Mata, com pouca ou nenhuma alteração da Pr, mantêm maiores valores de EXC durante a estação chuvosa, embora as anomalias sob cenários de aquecimento mais intensos indiquem redução progressiva do EXC. Essa dinâmica hídrica concentra riscos associados a eventos extremos, como alagamentos e enchentes, principalmente durante o período de verão (DJF), impactando a segurança hídrica, a agricultura e os sistemas urbanos (ÁVILA-DIAZ et al., 2022).

Adicionalmente, a tendência consistente de redução do EXC ao longo das estações chuvosas aponta para um comprometimento dos processos de recarga de aquíferos e da manutenção dos volumes em mananciais e reservatórios (HIRATA et al., 2012), especialmente sob o SSP5-8.5. Esse resultado é particularmente preocupante, pois indica diminuição da capacidade de armazenamento natural e amplificação do risco de crises hídricas prolongadas. Diante disso, torna-se imprescindível investir em obras e infraestruturas voltadas ao armazenamento e à recarga dos recursos hídricos, como

reflorestamento, bacias de recarga, valas de terraceamento e soleiras em encostas (OTTONI, 2019), assim como soluções tecnológicas. Nesse sentido, destacam-se a adoção de sistemas de gestão integrada de recursos hídricos (GAN et al., 2025) e o desenvolvimento de tecnologias que promovam maior eficiência no uso da água, contribuindo para a sustentabilidade e a resiliência hídrica.

A análise sazonal também evidenciou que a intensificação da DEF durante o outono e inverno pode prolongar a estação seca, uma vez que a redução do EXC no verão compromete a reposição hídrica justamente no período de maior precipitação. Essa dinâmica está associada a diversos fatores, incluindo características das bacias hidrográficas e padrões de uso e ocupação do solo (OTTONI, 2019). O comportamento observado indica alterações quantitativas e qualitativas no regime hídrico, sugerindo mudanças no ciclo das chuvas e na própria sazonalidade climática (ÁVILA-DIAZ et al., 2020). Para Minas Gerais, essas mudanças representam dois desafios principais: (i) a redução da recarga compromete mananciais e reservatórios utilizados no abastecimento urbano, especialmente em áreas densamente povoadas, como a Região Metropolitana de Belo Horizonte; e (ii) o prolongamento da seca aumenta a pressão sobre a agricultura, afetando culturas sensíveis e de grande relevância econômica, como milho, soja e café (ALVES et al., 2020; DIAS et al., 2024; FAGUNDES et al., 2025; MARTINS et al., 2022; TORRES et al., 2021), atualmente majoritariamente conduzidas em sistemas de sequeiro — o que pode gerar necessidade crescente de irrigação até o final do século.

Além disso, um dos aspectos mais críticos é a redução dos volumes de reposição nos reservatórios durante o verão, período em que se espera maior contribuição hídrica. Tais fatos também comprometem a segurança energética regional, uma vez que o estado apresenta elevada dependência da geração hidrelétrica. A redução da capacidade de armazenamento e de regularização dos rios limita a oferta de energia firme, aumentando a vulnerabilidade do sistema frente a variações climáticas e exigindo maior acionamento de fontes complementares (LIMA et al., 2015), muitas vezes mais onerosas e ambientalmente impactantes.

Do ponto de vista prático, os resultados deste estudo reforçam a necessidade de políticas públicas voltadas à adaptação climática e ao fortalecimento da segurança hídrica. Entre as medidas prioritárias destacam-se a ampliação da capacidade de reservatórios, a proteção de áreas de recarga, a revitalização das bacias hidrográficas por meio da conservação e restauração da cobertura vegetal — especialmente da Mata Atlântica —, além do incentivo a práticas agrícolas menos demandantes de água, como os sistemas

agroflorestais, e a modernização dos sistemas de irrigação também se apresenta como estratégia essencial para aumentar a eficiência hídrica e reduzir vulnerabilidades (MORGADO et al., 2024; FERREIRA et al., 2025).

Além disso, torna-se essencial a adaptação dos sistemas integrados de drenagem urbana para enfrentar, de forma equilibrada, tanto os picos de precipitação intensa quanto os períodos prolongados de estiagem. Para isso, recomenda-se a combinação de soluções baseadas na natureza, como bioretentores, telhados verdes, pavimentos permeáveis e valas vegetadas, com medidas de infraestrutura cinza voltadas ao reforço da capacidade de drenagem e ao armazenamento distribuído. Essa integração contribui para reduzir os volumes de escoamento superficial, ampliar a infiltração e, consequentemente, fortalecer a resiliência das cidades diante dos eventos extremos previstos (ZHOU et al., 2024; CANSIAN et al., 2025). No âmbito do suporte operacional e da resposta rápida, é estratégica a utilização de sistemas de monitoramento hidrometeorológico em tempo real, capazes de integrar dados de estações pluviométricas e fluviométricas, previsões numéricas e informações de sensoriamento remoto. Complementarmente, destaca-se a necessidade de modelagem de risco hídrico, incorporando os limites de segurança de infraestruturas críticas — como estações de bombeamento, reservatórios, redes de abastecimento e usinas geradoras — e avaliando cenários de falhas associadas a eventos combinados de chuvas intensas (GRACIOSA, 2010).

Além disso, a gestão hídrica estadual deve incorporar cenários climáticos futuros em seus planejamentos, a fim de reduzir a vulnerabilidade das populações e setores produtivos, prevenindo possíveis conflitos.

Dessa forma, as medidas de adaptação e mitigação devem ser planejadas considerando as especificidades de cada mesorregião, uma vez que os impactos hidrológicos e climáticos se manifestam de forma heterogênea ao longo do estado de Minas Gerais. Por exemplo, a mesorregião Norte de Minas Gerais tende a enfrentar desafios crescentes tanto em períodos de estresse hídrico — caracterizados por veranicos, redução da recarga de aquíferos e déficit de umidade no solo, que afetam práticas agrícolas como a cafeicultura e o cultivo de milho — quanto em períodos de excedente hídrico, que elevam os riscos de inundações, erosão e assoreamento, sobretudo em encostas e margens de rios (OTTONI, 2019).

A vulnerabilidade de bacias hidrográficas, como a do Rio Verde Grande, diante de secas prolongadas reforça a necessidade de estratégias adaptativas voltadas à eficiência no uso da água e ao fortalecimento da resiliência hídrica regional (CARVALHO DE SÁ

et al., 2018). Nesse contexto, iniciativas de gestão integrada dos recursos hídricos, como o Projeto Águas do Centro Sul (PACS), desempenham papel estratégico ao estimar a disponibilidade hídrica subterrânea (AGÊNCIA MINAS, 2023) e subsidiar processos de outorga e planejamento territorial, promovendo maior segurança hídrica e eficiência na gestão. Para mitigar os efeitos do estresse hídrico, destacam-se medidas como o planejamento participativo, a diversificação agrícola, a adoção de técnicas de irrigação eficiente (como gotejamento e microaspersão), a conservação do solo, o reflorestamento e a recuperação de nascentes (PINTO et al., 2005). Já para reduzir os impactos do excedente hídrico, recomenda-se a implementação de infraestruturas verdes, como sistemas de retenção de águas pluviais, valas de infiltração e faixas de vegetação ripária, além do aperfeiçoamento das redes de drenagem urbana, do monitoramento hidrológico em tempo real e da modelagem de risco de inundações (GRACIOSA, 2010). A consolidação desses instrumentos, apoiada por dados, planejamento intersetorial e uma governança hídrica efetiva, é essencial para fortalecer a resiliência socioambiental da mesorregião Sul/Sudeste frente à crescente variabilidade e incerteza climática.

Na Zona da Mata de Minas Gerais, os principais desafios decorrentes do aumento da temperatura média, já tem provocado um ligeiro acréscimo na DEF durante os períodos secos e uma intensificação dos episódios de EXC em épocas chuvosas (Figuras 14 a 17). Essa mesorregião é caracterizada por uma economia agroindustrial diversificada, com destaque para a cafeicultura, pecuária leiteira, processamento de alimentos e pelo turismo rural e ecológico em expansão, as quais são particularmente vulneráveis às oscilações na disponibilidade de água, sobretudo durante o outono e o inverno, quando a precipitação é reduzida e os mananciais sofrem maior pressão (ROCHA et al., 2025). Diante desse contexto, as estratégias de adaptação envolvem a adoção de sistemas de irrigação mais eficientes (como a irrigação por gotejamento e o manejo racional da água no solo), a incorporação de tecnologias voltadas à otimização hídrica nas cadeias agrícola e industrial, como sensoriamento remoto da umidade do solo, automação de equipamento (válvulas e bombas) controlada por sensores, sistema de recirculação e reuso de água, entre outros (FARIAS et al., 2020) e o planejamento integrado das bacias hidrográficas (COSTA et al., 2021). Entre as medidas estruturais, destacam-se as bacias de recarga, valas de terraceamento e demais práticas conservacionistas que favorecem a infiltração (OTTONI, 2019) e o armazenamento da água no solo, contribuindo para mitigar tanto os efeitos do estresse hídrico.

O Noroeste de Minas, o Triângulo Mineiro e o Alto Paranaíba enfrentarão os maiores desafios relacionados à alta demanda hídrica decorrente do aumento da Tas e DEF, redução da Pr e EXC acoplados as áreas de produção agrícola, como a cana-de-açúcar, soja e milho, e a pecuária intensiva (VASCONCELOS et al., 2008). Para garantir a sustentabilidade do setor agropecuário e o uso da água, é fundamental adotar ações prioritárias como: a modernização dos sistemas de irrigação, com a adoção de tecnologias como o gotejamento e sensores de umidade do solo; a regulação do uso da água, evitando irrigações em períodos de baixa vazão e restringindo a instalação de novos sistemas, seja por meio da suspensão de novas outorgas ou decisões coletivas dos irrigantes (FERREIRA et al., 2025); o monitoramento contínuo de aquíferos estratégicos, como o Guarani; a implementação de políticas de uso racional da água; e o investimento em monitoramento hidroclimático, que fornece dados atualizados e confiáveis, essenciais para tomadas de decisão informadas e para o planejamento hídrico eficiente e sustentável (FERREIRA et al., 2025).

A Região Central e a Região Metropolitana de Belo Horizonte, marcadas por alta densidade urbana, intensa pressão sobre os mananciais (MELO et al., 2021) e episódios recorrentes de crise hídrica e inundações, demandam estratégias integradas de adaptação e gestão hídrica (DRUMOND et al., 2023). Entre as ações prioritárias, destacam-se a diversificação das fontes de abastecimento de água, com ampliação do reuso, aproveitamento de águas pluviais e interligação de sistemas produtores (SORIANO et al., 2016); já para o combate as inundações, é imprescindível a implantação de infraestrutura verde urbana, como parques lineares, jardins de chuva, áreas permeáveis e corredores ecológicos, os quais contribuirão para a redução do escoamento superficial (SANTOS et al., 2013), a recarga de aquíferos e o controle de cheias. Atrelada a essas medidas, recomenda-se também a realização de incentivos ao transporte público sustentável e à mobilidade ativa, que, ao reduzir as emissões de gases de efeito estufa, auxilia na mitigação das mudanças climáticas e de seus impactos sobre o ciclo hidrológico regional (MARENGO et al., 2008).

O Norte de Minas é uma região altamente vulnerável do ponto de vista hídrico, devido as secas prolongadas, elevada evapotranspiração e baixa disponibilidade de recursos hídricos superficiais e subterrâneos (TUCCI et al., 2017). Diante do aumento da deficiência hídrica e da irregularidade das chuvas (Figuras 10 a 17), tornam-se essenciais investir na construção e ampliação de cisternas e barragens de acumulação para captação e armazenamento de águas pluviais, tanto para consumo humano quanto para a

dessedentação animal; o incentivo a práticas agrícolas adaptadas ao clima semiárido, com destaque para o cultivo de palma forrageira, sorgo e outras espécies resistentes à seca (NERES et al., 2025), além da adoção de sistemas agroflorestais e técnicas de conservação de solo e água. Complementarmente, o fortalecimento de programas de recarga artificial de aquíferos (MOURA et al., 2004), o uso racional da água na irrigação (com tecnologias de gotejamento e manejo eficiente da umidade do solo) e o monitoramento hidroclimático contínuo (DOS SANTOS et al., 2021) constituem medidas estratégicas para reduzir os impactos da variabilidade climática e promover a segurança hídrica regional.

Nos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, a vulnerabilidade hídrica e social é historicamente elevada, marcada pela irregularidade das chuvas, escassez de água superficial e subterrânea e pela degradação ambiental das bacias hidrográficas (RIBEIRO et al., 2003). A intensificação das secas, associada às mudanças climáticas, tende a agravar os déficits hídricos e a insegurança no abastecimento humano e produtivo, exigindo estratégias adaptativas integradas. Entre as principais medidas, destacam-se os programas de abastecimento comunitário de água, voltados à construção de cisternas, barraginhas e pequenos açudes de uso múltiplo, fundamentais para o armazenamento descentralizado e o aumento da resiliência hídrica local (NOGUEIRA et al., 2017). Complementarmente, são essenciais os projetos de recuperação de nascentes, recomposição de matas ciliares e manejo conservacionista do solo e da água, visando melhorar a infiltração, reduzir o assoreamento e aumentar a resiliência das bacias hidrográficas da região (BARROS et al., 2014). O fomento a práticas agrícolas adaptadas à seca, associado à educação ambiental e à governança participativa das bacias, constitui outro eixo estratégico para o enfrentamento da vulnerabilidade hídrica e o fortalecimento da segurança hídrica regional (ANA, 2021). Essas ações, articuladas em escala territorial, reforçam a necessidade de um planejamento hídrico voltado à convivência com o semiárido, que priorize a eficiência no uso da água, a equidade no acesso aos recursos hídricos e a sustentabilidade ecológica das microbacias.

O Vale do Rio Doce apresenta fragilidades hídricas decorrentes de atividades de mineração, desmatamento e presença de barragens de rejeito, que aumentam a vulnerabilidade ambiental e hídrica da região (OLIVEIRA et al., 2021). Para enfrentar o DEF nessa mesorregião, é fundamental investir na restauração florestal e recomposição de matas ciliares contribuem para melhorar a infiltração, reduzir a erosão e aumentar a recarga de aquíferos, além de regular o regime hídrico (FURTADO et al., 2019). O uso

eficiente da água, com reuso industrial, irrigação adequada e consumo consciente, ajuda a reduzir a pressão sobre os mananciais. O monitoramento hidrológico e o planejamento integrado permitem respostas proativas a eventos extremos, enquanto o engajamento comunitário e a educação ambiental fortalecem a resiliência regional (SYRKIS et al., 2024). A adoção coordenada dessas ações é essencial para equilibrar o setor de mineração, demanda urbana, agrícola e industrial e garantir a sustentabilidade hídrica do Vale do Rio Doce a médio e longo prazo.

6. CONCLUSÃO

O aquecimento global exercerá impactos profundos, complexos e espacialmente heterogêneos sobre a disponibilidade hídrica no estado de Minas Gerais. A análise dos limiares de aquecimento global estabelecidos pelo Acordo de Paris (1,5 °C e 2 °C) e dos limiares adicionais (3 °C e 4 °C), sob os cenários socioeconômicos SSP2-4.5 e SSP5-8.5, revelou intensificação da deficiência hídrica, especialmente nas mesorregiões Norte, Noroeste e Jequitinhonha, historicamente mais vulneráveis às variações climáticas.

O aquecimento global intensifica a demanda evaporativa da atmosfera, resultando em aumentos na ETR ($>1.100 \text{ mm ano}^{-1}$) e DEF ($>1.100 \text{ mm ano}^{-1}$), que são particularmente acentuados nos limiares de 3 °C e 4 °C (no SSP5-8.5), comprometendo a recarga de aquíferos, perenidade dos mananciais e regularidade das vazões. Tal fato pode ampliar o risco de escassez hídrica e de conflitos pelo uso da água entre os setores agrícola, urbano, energético e industrial.

A análise sazonal indica intensificação do estresse hídrico durante a estação seca (outono e inverno) e aumento do excedente hídrico nas mesorregiões Sul/Sudeste, Campo das Vertentes e Oeste de Minas durante a estação chuvosa (primavera e verão), aumentando a vulnerabilidade das atividades agropecuárias e dos sistemas de abastecimento urbano, e ameaçando a segurança energética regional, dada a dependência de Minas Gerais da geração hidrelétrica.

Por outro lado, as mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas e parte da Zona da Mata apresentam menor suscetibilidade à redução da disponibilidade hídrica nos limiares de 1,5 °C e 2 °C. No entanto, nos limiares mais elevados (3 °C e 4 °C), observa-se uma redução do EXC e maior concentração das chuvas em períodos mais curtos, o que aumenta o potencial para a ocorrência de eventos hidrológicos extremos, como inundações, alagamentos e enxurradas, com consequências econômicas, ambientais e sociais significativas.

Para reduzir tais impactos é preciso adotar medidas de adaptação eficientes, como ampliação da capacidade de armazenamento e recarga hídrica, reflorestamento e recuperação de nascentes, incentivo à eficiência no uso da água nos setores agrícola e industrial, modernização dos sistemas de irrigação, e fortalecimento dos programas de monitoramento hidroclimático. Incorporação de soluções baseadas na natureza, como infraestrutura verde, pavimentos permeáveis e jardins de chuva, aliada ao uso de tecnologias de monitoramento e alerta precoce, é fundamental para aumentar a resiliência hídrica e mitigar os impactos socioeconômicos do aquecimento global.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAMS, J. F.; HUNTINGFORD, C.; WILLIAMSON, M. S.; ARMSTRONG McKAY, D. I.; BOULTON, C. A.; BUXTON, J. E. Committed Global Warming Risks Triggering Multiple Climate Tipping Points. **Earth's Future**, v. 11, n. 11, p. 2022EF003250, 2023. <https://doi.org/10.1029/2022EF003250>.
- ABTEW, W. Evapotranspiration Measurements and Modeling for Three Wetland Systems in South Florida. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 32, n. 3, p. 465-473, 1996. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1996.tb04044.x>.
- AGÊNCIA MINAS. Projeto integrado estuda potencial hídrico de 54% do território de Minas. AGÊNCIA MINAS, Minas Gerais, 16 nov. 2023. Disponível em: <https://www.agenciaminas.mg.gov.br/noticia/projeto-integrado-estuda-potencial-hidrico-de-54-do-territorio-de-minas>. Acesso em: 14 out. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Mesorregiões. Brasília, DF: ANA, 2013. <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/2c32b39e-abf5-425b-922a-a407b1bf9f86>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Atlas Águas: Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: ANA, 2021. <https://tratabrasil.org.br/wp-content/uploads/2022/08/ANA-ATLAS-Aguas-AbastecimentoUrbano2021-compressed.pdf>.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021. Brasília, DF: ANA, 2021. <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>.
- AHMED, A. A., SAYED, S., ABDOULHALIK, A., MOUTARI, S., & OYEDELE, L. Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. **Journal of Cleaner Production**, v. 441, p. 140715, 2024. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2024.140715>.
- ALVES, A. M. M. R.; MARTINS, F. B.; REBOITA, M. S. Balanço hídrico climatológico para Itajubá-MG: cenário atual e projeções climáticas. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 712-732, 2020. <https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.70387>.

- ANDERSON, K. Duality in climate science. **Nature Geoscience**, v. 8, n. 12, p. 898–900, 2015. <https://doi.org/10.1038/ngeo2559>
- AVILA-DIAZ, A.; JUSTINO, F.; LINDEMANN, D. S.; RODRIGUES, J. M.; FERREIRA, G. R. Climatological aspects and changes in temperature and precipitation extremes in Viçosa-Minas Gerais. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 2, p. 20190388, 2020. <https://doi.org/10.1590/0001-3765202020190388>.
- BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; TASSI, R.; DALBIANCO, L.; OTTONELLI, A. S. Estimativa da infiltração de água no solo na escala de bacia hidrográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 557–564, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200020>.
- BASTOS, E. A.; FERREIRA, V. M.; SILVA, C. R.; ANDRADE JÚNIOR, A. S. Evapotranspiração e Coeficiente de Cultivo do Feijão-Caupi no Vale do Guruguia, Piauí. **Irriga**, v. 13, n. 2, p. 182–190, 2008. <https://doi.org/10.15809/irriga.2008v13n2p182-190>.
- BENASSI, R. B. Consequência do aumento da temperatura média global em 1,5 °C e 2°C no balanço Hídrico para o eucalipto na América do sul. 2020. 73 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.
- BERNARDINO, Juliana; SALDANHA, Rafael. Chuvas deixam 25 mortos e mais de 3 mil pessoas desalojadas em Minas Gerais. CNN BRASIL, São Paulo, 15 jan. 2025. Disponível em: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/sudeste/mg/chuvas-deixam-25-mortos-e-mais-de-3-mil-pessoas-desalojadas-em-minas-gerais/>. Acesso em: 26 fev. 2025.
- BLACK, P.E. Watershed Hydrology. 2ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 408p, 1996.
- BOOGAARD, F, C. Spatial and time variable long term infiltration rates of green infrastructure under extreme climate conditions, drought and highly intensive rainfall. **Water**, v. 14, n. 6, p. 840, 2022. <https://doi.org/10.3390/w14060840>.
- BORGES, Willian Bernardino. Manejo de Irrigação com Base na Evapotranspiração para Redução do Consumo de Água. 2016. 12f. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade de Rio Verde (UNIRV), 2016. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/MANEJO%20DE%20IRRIGA%C3%87%C3%83O%20COM%20BASE%20NA%20EVAPOTRANSPIRA%C3%87%C3%88>

[3O%20PARA%20REDU%C3%87%C3%83O%20DO%20CONSUMO%20DE%20C3%81GUA.pdf.](#)

BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E; JÚNIOR, M. B. S.; CAPISTRANO, V. B.; MALAGUTTI, M.; TAMAOKI, J. N.; OLIVEIRA, B. F. A.; NOBRE, C. A. Amazon savannization and climate change are projected to increase dry season length and temperature extremes over Brazil. **Scientific Reports**, v. 14, n. 5131, 2024. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-55176-5>.

BRUNO, I. P.; SILVA, A. L.; REICHARDT, K.; DOURADO-NETO, D.; BACCHI, O. O. S.; VOLPE, C. A. Comparison between climatological and field water balances for a coffee crop. **Scientia Agricola**, v. 64, n. 3, p. 215–220, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162007000300001>.

CANSIAN, A. R.; GUZMÁN, D. A.; ROSA, A.; MACHADO, J. T. Nature-Based Solutions for Urban Drainage: A Systematic Review of Sizing and Monitoring Methods. **Water**, v. 17, n. 2524, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17172524>

CARVALHO DE SÁ, M.; VIEIRA, E. O.; RODRIGUES, F. M.; ALBUQUERQUE, L. C.; CALDEIRA, N. R. Climate Change and Water Resource Sustainability Index for a Warer-Stressed Basin in Brasil: The Case Study of Rio Verde Grande Basin. **Nativa**, v. 6, n. 5, p. 480-485, 2018. <https://doi.org/10.31413/nativa.v6i5.5719>.

COELHO, E. F.; FILHO, M. A. C.; DE OLIVEIRA, S. L. Agricultura irrigada: eficiência de irrigação e de uso de água. **Bahia Agríc.**, v. 7, n. 1, p. 57-60, 2005.

COSTA, M. L. M. E.; SILVA, T. C. DA.; LIMEIRA, M. C. M. Investigação sobre as relações interinstitucionais e interdisciplinares para o planejamento integrado de recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Gramame, Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 2, p. 291-299, 2021. <https://doi.org/10.1590/S1413-415220190119>.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. **Aquífero Guarani**. <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/consulta-por-aquiferos-monitorados/aquifero-guarani/>.

DARELA FILHO, J.P.; LAPOLA, D.M.; TORRES, R.R.; LEMOS, M.C. Socio-climatic hotspots in Brazil: how do changes driven by the new set of IPCC climatic projections affect their relevance for policy? **Climatic Change**, v. 136, p. 413-425, 2016. <https://doi.org/10.1007/s10584-016-1635-z>.

DE CARVALHO, D. W. As Mudanças Climáticas e a Formação do Direito dos Desastres. *Novos Estudos Jurídicos*, Itajaí (SC), v. 18, n. 3, p. 397-415, 2013. <https://doi.org/10.14210/nej.v18n3.p397-415>.

DIAS, C. G.; MARTINS, F. B.; MARTINS, M. A. Climate risks and vulnerabilities of the Arabica coffee in Brazil under current and future climates considering new CMIP6 models. *Science of The Total Environment*, v. 907, p. 167753, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167753>

DOS SANTOS, J. M.; DIAS, F. O.; DE JESUS, S. S. Manejo de Águas Servidas e a Experiência de Monitoramento Hidroclimático e em Ambiente Semiárido. *Revista Eletrônica de Geografia*, v. 19, n. 2, p. 183-199, 2021. <https://doi.org/10.5016/estgeo.v20i1.15896>.

DOURADO-NETO, D.; LIER, Q.de.J.V.; METSELAAR, K. General procedure to initialize the cyclic soil water balance by the Thornthwaite and Mather method. *Scientia Agricola*, v. 67, n. 1, p. 87-95, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000100013>.

DRUMOND, R. A. S.; ALMEIDA, R. P.; NASCIMENTO, N. DE O. Mudanças climáticas e Plano Diretor: mitigação de inundações em Belo Horizonte. *Cadernos Metrópole*, v. 25, n. 58, p. 899-922, 2023. <https://doi.org/10.1590/2236-9996.2023-5806>.

DUNNE, T.; LEOPOLD, L.B. *Water in Environmental Planning*. W.H. Freeman, San Francisco, CA, USA. 818p, 1970.

FAGUNDES, F. F. A.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R. MARRAFON, V. H. A. Global Warming Levels (1.5–4 °C) and Water Availability for Eucalyptus Plantations Based on High-resolution CMIP6 Models. *Earth Systems and Environment*, p. 1-18, 2025. <https://doi.org/10.1007/s41748-025-00916-4>.

FARIAS, C. J.; HEINRICH, R. C.; ROESLER, M. R. V. B. A Invisibilidade da água na Produção dos Alimentos: Interfaces entre Economia e Desenvolvimento Sustentável. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 9, n. 1, p. 513-523, 2020. <https://doi.org/10.19177/rgsa.v9e12020513-523>.

FERREIRA, R. A.; Mudanças Climáticas no Vale do São Francisco: impactos e estratégias de adaptação socioambiental. *RCMOS - Revista Científica Multidisciplinar O Saber*, v. 1, n. 2, p. 1-4, 2025. <https://doi.org/10.51473/rcmos.v1i2.2025.1438>.

FLORÊNCIO, G. W. L.; MARTINS, F. B.; FAGUNDES, F. F. A. Climate change on Eucalyptus plantations and adaptive measures for sustainable forestry development across Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 188, p. 1-12, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115538>.

FURTADO, A. P. F. V.; TOLENTINO, R. J. V.; FERNANDES, G. L. G. F. A Interface entre Planos de Ação Emergencial e os Planos de Contingência no Âmbito da Segurança de Barragens: um Estudo para as Barragens de Controle de Cheias da Prefeitura de Belo Horizonte-MG. **XXIII SBRH - Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2019. <https://anais.abrhidro.org.br/job.php?Job=5128>.

GAN, L.; WEI, Y.; WU, S. Linking Water Technologies with Water Practices: Case Studies from 11 Countries. **Water Resour Manage**, v. 39, p. 5653-5671, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11269-025-04223-5>.

GARCIA, S.R.; CALHEIROS, A.J.P.; KAYANO, M.T. Revised method to detect the onset and demise dates of the rainy season in the South American Monsoon areas. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 126, n. 3-4, p. 481-491, 2015. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1599-3>.

GEIRINHAS, J. L.; RUSSO, A.; LIBONATI, R.; SOUZA, P. M.; MIRALLES, D. G.; TRIGO, R. M. Recent increasing frequency of compound summer drought and heatwaves in Southeast Brazil. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 3, 2021. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/abe0eb/meta>.

GLOBAL WATER PARTNERSHIP, **Water Security: Putting the Concept into Practice**, 2014.

GOMES, J. DE L.; BARBIERI, J. C. Gerenciamento de recursos hídricos no Brasil e no Estado de São Paulo: um novo modelo de política pública. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 2, n. 3, p. 01–21, 2004. <https://doi.org/10.1590/S1679-39512004000300002>

GRACIOSA, Melissa Cristina Pereira. Modelo de Seguro para Riscos Hidrológicos com Base em Simulações Hidráulico-Hidrológica como Ferramenta de Gestão do Risco de Inundações. 2010. 191f. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil (Hidráulica e Saneamento), 2010. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-13082010-102943/publico/GraciosaTese.pdf>.

G1. Seca: Minas Gerais já registra situação de emergência em 135 cidades; em 2023, número só foi alcançado em outubro. G1 Minas, Minas Gerais, 4 ago. 2024. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2024/08/04/seca-minas-gerais-ja-registra-situacao-de-emergencia-em-135-cidades-em-2023-numero-so-foi-alcancado-em-outubro.ghtml>. Acesso em: 26 fev. 2025.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. Groundwater resources in Brazil: a review of possible impacts caused by climate change. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 84, n. 2, p. 297-312, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0001-37652012005000037>

IPCC. AR6 Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

KARMALKAR, A. V.; BRADLEY, R. S. Consequences of global warming of 1.5°C and 2°C for regional temperature and precipitation changes in the contiguous United States. **PLOS ONE**, v. 12, n. 1, p. 0168697, 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168697>.

KING, A. D.; BOROWIAK, A. R.; BROWN, J. R.; FRAME, D. J.; HARRINGTON, L. J.; MIN, S.-K; PENDERGRASS, A.; RUGENSTEIN, M.; SNIDERMAN, J. M. K; STONE, D. A. Transient and Quasi-Equilibrium Climate States at 1.5°C and 2°C Global Warming. **Earth's Future**, v. 9, n. 11, p. 12, 2021. <https://doi.org/10.1029/2021EF002274>.

LEITE, Alisson Rodolfo. Tecnologias para Monitoramento da Evapotranspiração: Desenvolvimento de Métodos para Coleta e Armazenamento de Dados em Áreas Rurais. 2025 154p. Tese (Doutorado em Agronegócio e Desenvolvimento) – Faculdade de Ciências e Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Tupã, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/296362>.

- LEMES, M. R.; SAMPAIO, G.; GARCIA-CARRERAS, L.; FISCH, G.; ALVES, L. M.; BASSETT, R.; BETTS, R.; MAKSIĆ, J.; SHIMIZU, M. H.; TORRES, R. R.; GUATURA, M.; BASSO, L. S.; BISPO, P. D. C. Impacts on South America moisture transport under Amazon deforestation and 2° C global warming. **Science of The Total Environment**, v. 905, p. 1-14, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167407>
- LEMES, M. R.; SAMPAIO, G.; FISCH, G.; ALVES, L. M.; MAKSIĆ, J.; GUATURA, M.; SHIMIZU, M. Impacts of atmospheric CO₂ increase and Amazon deforestation on the regional climate: a water budget modelling study. **International Journal of Climatology**, v. 43, n. 3, p. 1497–1513, 2023. <https://doi.org/10.1002/joc.7929>.
- LI, Z.; FANG, G.; CHEN, Y.; DUAN, W.; MUKANOV, Y. Agricultural water demands in Central Asia under 1.5 °C and 2.0 °C global warming. **Agricultural Water Management**, v. 231, p. 106020, 2020. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106020>.
- LOMBARDI, R.; DAVIS, M. A. L. Setting the Stage: How Abrupt Climate Change, Geomorphological Thresholds, and Drought Control Flood Response in the Lower Tennessee River, USA. **Quaternary Science Reviews**, v. 301, p. 107931, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2022.107931>.
- MARENGO, J. A. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 83–96, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006>.
- MARIANI, L.; GUARENGHI, M. M.; MITO, J. Y. L.; CAVALEIRO, C. K. N.; GALVÃO, R. R. A. Análise de oportunidades e desafios para o Nexso Água-Energia. **Desenvolvimento e Meio Ambiente (DMA)**, v. 37, p. 9-30, 2016. <https://doi.org/10.5380/dma.v37i0.45046>.
- MARTIN, T.N.; DOURADO-NETO, D.; STORCK, L.; BURAEI, P.; SANTOS, E.A. Regiões homogêneas e tamanho de amostra para atributos do clima no estado de São Paulo, Brasil. **Ciência Rural**, v. 38, n. 3, p. 690-697, 2008. <https://doi.org/10.1590/s0103-84782008000300015>.
- MARTINS, F. B.; BENASSI, R. B.; TORRES, R. R.; BRITO NETO, F.A. Impacts of 1.5° C and 2° C global warming on Eucalyptus plantations in South America. **Science of The Total Environment**, v. 825, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153820>.
- MBA, W. P., LONGANDJO, G. N. T., MOUFOUMA-OKIA, W., BELL, J. P., JAMES, R., VONDOU, D. A., HAENSLER, A., FOTSO-NGUEMO, T. C., GUENANG, G. M.,

TCHOTCHOU, A. L. D., KAMSU-TAMO, P. H., TAKONG, R. R., NIKULIN, G., LENNARD, C. J., DOSIO, A. Consequences of 1.5° C and 2° C global warming levels for temperature and precipitation changes over Central Africa. **Environmental Research Letters**, v.13, n.5, 2018. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab048>

MEDEIROS, Camila Santos. *Vulnerabilidade dos Sistemas de Transporte em Áreas de Inundação: Uma Mudança nos Padrões de Mobilidade e a Busca Pela Adaptação às Alterações Climáticas*. 2019. 24f. Dissertação (Mestrado em Urbanismo Sustentável e Ordenamento do Território) - Universidade NOVA de Lisboa, Lisboa, 2019. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/7bd332cb94eada7bcb111045b6d03f86/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2026366&diss=y>.

MELO, M. C.; JOHNSON, R. M. F. O Conceito Emergente de Segurança Hídrica. **Sustentare**, v. 1, n. 1, p. 72-92, 2017. <http://dx.doi.org/10.5892/st.v1i1.4325>.

MELESSE, A. M.; WENG, Q. H.; THENKABAIL, P. S.; SENAY, G. B. Sensores de Sensoriamento Remoto e Aplicações em Mapeamento e Modelagem de Recursos Ambientais. **Sensores**, v. 7, n. 12, p. 3209-3241, 2007. <https://doi.org/10.3390/s7123209>.

MELO, M. C.; QUEIROZ, V. C.; FORMIGA-JOHNSSON, R. M.; AZEVEDO, J. P. S.; NASCIMENTO, N. O.; MACHADO, F. L. V.; SÁ, R. V.; RIMULO, B. A. Avaliação da Segurança Hídrica para Abastecimento Público na Região Metropolitana de Belo Horizonte: Estudo da Crise Hídrica 2014-2015. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 680–701, 2021. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.62462>.

MENDONÇA, P.V.E. 1958. Sobre o novo método de balance hídrico de Thornthwaite e Mather. In: Congresso Luso-Espanhol Para El Progreso De Las Ciencias 24, Madrid, Spain. p.415-425.

MONTEIRO, A. F. M.; MARTINS, F. B.; TORRES, R. R.; DE ALMEIDA, V. H. M.; ABREU, M. C.; MATTOS, E. V. Intercomparison and uncertainty assessment of methods for estimating evapotranspiration using a high-resolution gridded weather dataset over Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 146, p. 583–597, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03747-1>.

MORGADO, I.; RIBEIRO COSTA, L.; FERNANDES, G.; COSTA, H. O Plano Mineiro de Segurança Hídrica: desenvolvimento, impactos na gestão dos recursos hídricos em Minas Gerais e seus desafios. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 5, p. e024001, 2024. <https://doi.org/10.59824/rmrh.v5.290>.

MOURA, A. N. Recarga Artificial de Aquíferos: os Desafios e Riscos para Garantir o Suprimento Futuro de Água Subterrânea. **XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas**, v. 1, p. 1-19, 2004. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23608/15688>.

NERES, D. R.; SANTOS, J. P. P.; VICENTE, M. R.; DOS SANTOS, R. M.; LUCAS, P. O. Efeitos das Mudanças Climáticas na Região Norte de Minas Gerais. **Revista Mineira de Recursos Hídricos**, v. 6, p. 025001, 2025. <https://doi.org/10.59824/rmrh.v6.329>.

NETO, J. A. F.; OLIVEIRA, H. C.; OLIVEIRA, N. K.; CUNHA, A. S. Inundações urbanas e as técnicas de redução de escoamento superficial de águas pluviais. **Revista Engenharia de Interesse Social**, v. 1, n. 4, p. 1-17 2019. <https://doi.org/10.35507/25256041/reis.v1i4.3076>.

NOGUEIRA, D. Segurança hídrica, adaptação e gênero: o caso das cisternas para captação de água de chuva no semiárido brasileiro. **Sustentabilidade em Debate – Brasília**, v. 8, n. 3, p. 22-36, 2017. <https://doi.org/10.18472/SustDeb.v8n3.2017.26544>.

OCDE, Segurança hídrica para vidas melhores, Estudos da OCDE sobre água, Publicações da OCDE, Paris, 2013. <https://doi.org/10.1787/9789264202405-en>.

OLIVEIRA, B. T. Á.; OLIVEIRA, C. V.; FELIPPE, M. F. Influência dos depósitos de rejeito de mineração nas características físico-químicas das águas: estudos na planície tecnogênica do Alto Rio Doce, MG. **Caderno de Geografia, Belo Horizonte**, v. 31, n. 1, p. 70-89, 2021. DOI 10.5752/p.2318-2962.2021v31nesp1p70.

OTTONI, A. B. Alternativa Energética e Sanitária-Ambiental para Prevenção, Controle e Aproveitamento dos Deflúvios de Enchentes na Cidade de São Paulo. Direito Autoral CONFEA N° 1172, out. 2019.

UDIN, L., HERVIEU, F., MICHEL, C., PERRIN, C., ANDRÉASSIANO, V., ANCTIL, F., LOUMAGNE, C. Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall–runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall–runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v. 303, p. 290-306, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.026>.

PARREIRA, A. G. B., MARASCA, I., SOLINO, A. J. S., SANTOS, G. O. Water balance climatological to the county of Rio Verde, Goiás. **Científic@ Multidisciplinary**

Journal, v. 6, n. 1, p. 26-33, 2019. <http://dx.doi.org/10.29247/2358-260X.2019v6i1.p26-33>.

PINHATI, F. S. C.; SOUZA, S. A.; VILLELA, W. M. C. Avaliação de um cenário de ampliação da irrigação na bacia do rio São Marcos por meio de geoprocessamento e desenvolvimento de ferramenta computacional para cálculo do balanço hídrico na escala de Ottobacias. In **XXII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, p. 1-8, 2017. <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/60/PAP022283.pdf>.

PINTO, L. V. A.; BOTELHO, S. A.; FILHO, A. T. O.; DAVIDE, A. C. Estudo da vegetação como subsídios para propostas de recuperação das nascentes da bacia hidrográfica do ribeirão Santa Cruz, Lavras, MG. **Revista Árvore**, v. 29, n. 5, p. 775-793, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000500013>.

PLANO NACIONAL DE SEGURANÇA HÍDRICA (PNSH). Plano Nacional de Segurança Hídrica, 2019. <https://pnsh.ana.gov.br/programa>.

RADIN, B.; BERGAMASCHI, H.; SANTOS, A. O.; BERGONCI, J. I.; FRANÇA, S. Evapotranspiração da Cultura do Milho em Função da Demanda Evaporativa Atmosférica e do Crescimento das Plantas. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 9, n. 1/2, p. 7–16, 2003. <https://revistapag.agricultura.rs.gov.br/ojs/index.php/revistapag/article/view/412>.

RAZA, A.; HU, Y.; ACHKARKI, S.; BUTTAR, N.A.; RAY, R. L.; KHALIQ, A.; ZUBAIR, N.; ZUBAIR, M.; SYED, N. R.; ELBELTAGI, A. Evapotranspiration Importance in Water Resources Management Through Cutting-Edge Approaches of Remote Sensing and Machine Learning Algorithms. In: HU, Yongguang et al. (ed.). **Surface and Groundwater Resources Development and Management in Semi-arid Region**. Springer, 2023. p. 1–20. https://doi.org/10.1007/978-3-031-29394-8_1.

REBOITA, M. S.; MARRAFON, V. H. A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R. P. Cenários de Mudanças Climáticas Projetados para o Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 33, p. 110-128, 2018. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i0.60524>.

REBOUÇAS, A. C.; AMORE, L. O Sistema Aquífero Guarani - SAG. **Águas Subterrâneas**, v. 16, n. 1, 2002. <https://doi.org/10.14295/ras.v16i1.1306>.

RIAH, K.; VUUREN, D. P. V.; KRIEGLER, E.; EDMONDS, J.; O'NEILL, B. C.; FUJIMORI, S.; BAUER, N.; CALVIN, K.; DELLINK, R.; FRICKO, O.; LUTZ, W.; POPP, A.; CAURESMA, J. C.; EMMERLING, J.; EBI, K.; HASEGAWA, T.; HAVLIK,

P.; HUMPENODER, F.; DA SILVA, L. A.; SMITH, S.; STEHFEST, E.; BOSETTI, V.; EOM, J.; GERNAAT, D.; MASUI, T.; ROGELJ, J.; STREFLER, J.; DROUETI, L.; KREY, V.; LUDERER, G.; HARMSSEN, M.; TAKAHASHI, K.; BAUMCGARK, L.; DOELMAN, J. C.; KAINUMA, M.; KLIMONT, Z.; MARANGONI, G.; LOTZECAMPEN, H.; OBERSTEINER, M.; TABEAU, A.; TAYONI, M. The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. **Global Environmental Change**, v. 42, p. 153-168, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009>.

RIBEIRO, A. F.; MARTINS, F. B.; SANTOS, D. F.; TORRES, R. R.; FAGUNDES, F. F. A. Suitable areas for temperate fruit trees in a Brazilian hotspot area: changes driven by new IPCC scenarios. **European Journal of Agronomy**, v.155, p.127110, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127110>.

RIBEIRO, C. L. C.; DE MELLO, C. R.; GUZMAN, J. A. Groundwater storage trend in headwater basins: shreds of evidence from the last decades in Minas Gerais state, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 83, n. 327, 2024. <https://doi.org/10.1007/s12665-024-11645-8>.

RIBEIRO, E. M.; GALIZONI, F. M. Água, população rural e políticas de gestão: o caso do vale do Jequitinhonha, Minas Gerais. **Ambiente & Sociedade**, v. 2, p. 129-146, 2003. <https://doi.org/10.1590/S1414-753X2003000200008>.

ROCHA, W. da S.; SANTOS, S. de A. Vulnerabilidade ambiental e hídrica em bacias hidrográficas semiáridas: dinâmica, riscos e conservação. *Revista Ouricuri*, Brasil, v. 15, n. 1, p. 03–25, 2025. <https://doi.org/10.59360/ouricuri.vol15.i1.a23256>.

RODRIGUES, L. N.; CRUVINEL, P. E. A importância da gestão de recursos hídricos e da agricultura irrigada nonexo água e alimento. *Notícias Embrapa*, 21 mar. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/69094216/artigo-a-importancia-da-gestao-de-recursos-hidricos-e-da-agricultura-irrigada-no-nexo-agua-e-alimento>. Acesso em: 28 fev. 2025.

RODRIGUES, L. G.; DA SILVA, R. P.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C. W.; SOUZA, F. L. M. Desenvolvimento de software para o manejo da irrigação utilizando a evapotranspiração da cultura. **Revista Eletrônica Competências Digitais para Agricultura Familiar**, v. 7, n. 1, p. 66-90, 2021. <https://owl.tupa.unesp.br/recodaf/index.php/recodaf/article/view/132>.

- RUFINO, P. R., GÜCKER, B., VOLK, M., STRAUCH, M., CARDOZO, F. da S., BOËCHAT, I. G., FARAMARZI, M., PEREIRA, G. Modeling the Nexus of Climate Change and Deforestation: Implications for the Blue Water Resources of the Jari River, Amazonia. **Water**, v. 17, n. 5, p. 660, 2025. <https://doi.org/10.3390/w17050660>.
- RUSHTON, K.R.; EILERS, V.H.M.; CARTER, R.C. 2006. Improved soil moisture balance methodology for recharge estimation. **Journal of Hydrology**, v. 318, p. 379-399, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.06.022>.
- SALES, Mariana Alexandre de Lima. *Balanço hídrico na sub-bacia hidrográfica do Boi Branco – SP para gestão sustentável da agricultura irrigada*. 2014. xv, 120 f. Dissertação (Mestrado Agronomia (Irrigação e Drenagem) - FCA) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/110962>.
- SAMUEL, S.; DOSIO, A.; MPHALE, K.; FAKA, D. N.; WISTON, M. Comparison of multi-model ensembles of global and regional climate model projections for daily characteristics of precipitation over four major river basins in southern Africa. Part II: Future changes under 1.5° C, 2.0° C and 3.0° C warming levels. **Atmospheric Research**, v.293, p.106921, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2023.106921>
- SANCHES, F. O.; SILVA, R. V.; FERREIRA, R. V.; CAMPOS, C. A. A. Climate Change in the Triângulo Mineiro Region. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, p. 570-587, 2017. <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14024/7265>
- SANTOS, Diego. Entenda a evapotranspiração no Brasil e a disponibilidade hídrica. BoosterAgro, 11 ago. 2022. Disponível em: <https://boosteragro.com/blog-po/evapotranspiracao-no-brasil/>. Acesso em: 05 mar. 2025.
- SANTOS, D. F. dos; MARTINS, F.B.; TORRES, R.R. Impacts of Climate projections on water balance and implications on olive crop in Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 77-82, 2017. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v21n2p77-82>.
- SANTOS, G. G.; GRIEBELER, N. P.; OLIVEIRA, L. F. C. Chuvas intensas relacionadas à erosão hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 115-123, fev. 2010. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000200001>.

- SANTOS, P. T. DA S.; DOS SANTOS, S. M.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; COUTINHO, A. P.; DE MOURA, G. S. S.; ANTONINO, A. C. D. Telhado verde: desempenho do sistema construtivo na redução do escoamento superficial. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 161-174, jan. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1678-86212013000100011>.
- SILVA, V. O.; DE MELLO, C. R.; CHOU, S. C. Projections of severe droughts in future climate in Southeast Brazil: a case study in Southern Minas Gerais State, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 148, p. 1289-1302, 2022. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-03993-x>.
- SNYDER, R. L.; MORATIEL, R.; ZHENWEI, C.; SWELAM, A. Evapotranspiration Response to Climate Change. **Acta Horticulturae**, v. 922, p. 91-98, 2011. <http://dx.doi.org/10.17660/ActaHortic.2011.922.11>.
- SORIANO, É.; LONDE, L. R.; DI GREGORIO, L. T.; COUTINHO, M. P.; SANTOS, L. B. L. Water crisis in São Paulo evaluated under the disaster's point of view. **Ambiente & Sociedade**, v. 19, n. 1, p. 21-42, 2016. <https://doi.org/10.1590/1809-4422ASOC150120R1V1912016>.
- SOUZA, H. M.; AQUILINO, A. M.; FERREIRA, M. L.; MACHADO, C. A.; FERREIRA, F. L. Temporal analysis of the evolution of the area irrigated by the central pivot, in the municipality of Unaí - MG. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 10, p. e228111032413, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i10.32413>.
- SPAROVEK, G.; JONG, V. L. Q.; DOURADO-NETO, D. Computer assisted Köppen climate classification for Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 2, p. 257-266, 2006. <https://doi.org/10.1002/joc.1384>.
- STEENHUIS, T.; VAN DER MOLEN, W. The Thornthwaite-Mather procedure as a simple engineering method to predict recharge. **Journal of Hydrology**, v. 84, p. 221-229, 1986. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(86\)90124-1](https://doi.org/10.1016/0022-1694(86)90124-1).
- SYRKIS, G. W.; WESTIN, F. F.; SIMÕES, A. F.; COSTA, H. K. M. Vulnerabilidade às Mudanças Climáticas e Análise da Implementação de Medidas de Adaptação de Medidas de Adaptação em Estados. **Boletim de Conjuntura (BOCA)**, v. 19, n. 56, p. 606-635, 2024. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13977289>.

TAVARES, P. S.; ACOSTA, R.; NOBRE, P.; RESENDE, N. C.; CHOU, S. C.; LYRA, A. A. Water balance components and climate extremes over Brazil under 1.5 °C and 2.0 °C of global warming scenarios. **Regional Environmental Change**, v. 23, n. 40, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10113-023-02042-1>

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. 1957.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The moisture balance. **Publications in climatology**, v. 8, 1955.

THRASHER, B.; WANG, W.; MICHAELIS, A.; MELTON, F.; LEE, T.; NEMANI, R. NASA Global Daily Downscaled Projections, CMIP6. **Scientific data**, v.9, n.1, p.262, 2022. <https://doi.org/10.1038/s41597-022-01393-4>.

TORRES, R. R.; BENASSI, R. B.; MARTINS, F. B.; LAPOLA, D. M. Projected impacts of 1.5°C and 2°C global warming on temperature and precipitation patterns in South America. **International Journal of Climatology**, v.42, n.3, p.1597-1611, 2021. <https://doi.org/10.1002/joc.7322>.

TUCCI, C. E. M.; CHAGAS, M. F. Segurança hídrica: conceitos e estratégia para Minas Gerais. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 14, n. 12, 2017. <http://dx.doi.org/10.21168/reg.v14e12>

TURC, L. Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. **Ann. Agron.** v. 12, p. 13-49, 1961.

UNESCO. World Water Assessment Programme (WWAP). Managing Water Under Uncertainty and Risk. Paris: UNESCO, 2012.

UNFCCC, 2015. Adoption of the Paris Agreement. Conference of the Parties, Paris, France, November 30–December 11.

UN-WATER. Water security & the global water agenda: a UN-Water analytical brief. Ontário: United Nations University, 2013. 37 p.

VAN VLIET, J.; VAN DEN BERG, M.; SCHAEFFER, M.; VAN VUUREN, D. P.; DEN ELZEN, M.; HOF, A. F. Copenhagen Accord pledges imply higher costs for staying

below 2°C warming. **Climatic Change**, v. 113, n. 2, p. 551-561, 2012. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0458-9>

VAN VUUREN, D. P., EDMONDS, J., KAINUMA, M. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, v. 109, n. 5, p. 5-31, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.

VASCONCELOS, V. V.; SOARES, J.; HADAD, R. M.; JUNIOR, P. P. M.; CASTRO, J. F. M. História, economia e recursos naturais: a bacia hidrográfica de Entre-Ribeiros, no Noroeste de Minas Gerais. **Caderno de Geografia**, v. 18, p. 39-57, 2008.

VILLA, B. de; PETRY, MT; MARTINS, JD; TONETTO, F.; TOKURA, LK; MOURA, MB de; SILVA, CM da; GONÇALVES, AF; CERVEIRA, MP; SLIM, JE; SANTOS, MS dos; BELLÉ, MG; JIMENEZ, DH. Climatological water balance: a review. **Research, Society and Development**, v. 6, p. e50211626669, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i6.26669>.

WILLMOTT, C. J.; ROWE, C. M.; MINTZ, Y. Climatology of the Terrestrial Seasonal Water Cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, n. 6, p. 589-606, 1985. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050602>.

ZÁKHIA, E. M. S. Impactos das Mudanças Climáticas em uma Bacia Hidrográfica no Sul do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 4, p. 667–681, 2021. <https://doi.org/10.1590/0102-7786360002>.

ZHANG, Y.; LI, H.; REGGIANI, P. Climate Variability and Climate Change Impacts on Land Surface, Hydrological Processes and Water Management. **Water**, v. 11, n. 7, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11071492>.

ZHOU, K.; KONG, F.; YIN, H. Urban flood risk management needs nature-based solutions: a coupled social-ecological system perspective. **NPJ Urban Sustainability**, v. 4, n. 25, 2024. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00162-z>

ANEXO 1

Tabela referente ao ano central em que os limiares de aquecimento global de 1,5 °C, 2 °C, 3 °C e 4 °C são projetados para serem atingidos sob os cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. O asterisco (*) indica que, de acordo com a projeção do modelo, o respectivo limiar de temperatura não é alcançado até o ano de 2100.

Modelos do CMIP6	SSP2-4.5				SSP5-8.5			
	1,5°C	2°C	3°C	4°C	1,5°C	2°C	3°C	4°C
ACCESS-CM2	2027	2040	2069	*	2025	2037	2055	2070
ACCESS-ESM1-5	2030	2046	*	*	2028	2039	2061	2079
BCC-CSM2-MR	2037	2059	*	*	2032	2044	2066	*
CanESM5	2013	2024	2050	2084	2012	2023	2041	2055
CESM2	2029	2043	2080	*	2024	2036	2055	2072
CESM2-WACCM	2026	2041	2080	*	2022	2037	2056	2072
CMCC-ESM2	2030	2041	2065	*	2029	2039	2055	2070
CNRM-CM6-1	2030	2048	2084	*	2028	2041	2058	2072
CNRM-ESM2-1	2038	2056	2090	*	2033	2046	2065	2079
EC-Earth3	2023	2045	2086	*	2025	2036	2058	2074
EC-Earth3-Veg-LR	2028	2050	*	*	2029	2042	2062	2076
FGOALS-g3	2026	2068	*	*	2024	2045	2072	*
GFDL-CM4	2031	2049	*	*	2029	2041	2059	2079
GFDL-ESM4	2044	2070	*	*	2038	2052	2075	*
GISS-E2-1-G	2022	2032	2082	*	2021	2030	2057	2078
HadGEM3-GC31-LL	2020	2033	2062	*	2020	2030	2048	2063
IITM-ESM	2034	2059	*	*	2035	2047	2075	*
INM-CM4-8	2034	2062	*	*	2030	2045	2069	*
INM-CM5-0	2036	2071	*	*	2030	2045	2073	*
IPSL-CM6A-LR	2018	2034	2064	*	2018	2034	2050	2066
KACE-1-0-G	2013	2024	2050	*	2014	2024	2043	2063
KIOST-ESM	2020	2039	*	*	2016	2037	2063	*
MIROC-ES2L	2046	2073	*	*	2040	2053	2076	*
MIROC6	2042	2064	*	*	2035	2048	2071	*

MPI-ESM1-2-HR	2038	2064	*	*	2033	2049	2074	*
MPI-ESM1-2-LR	2036	2057	*	*	2034	2049	2071	*
MRI-ESM2-0	2029	2047	*	*	2025	2037	2063	2082
NESM3	2024	2043	*	*	2021	2034	2054	2072
NorESM2-LM	2052	2081	*	*	2041	2055	2077	*
NorESM2-MM	2047	2078	*	*	2040	2054	2077	*
Média	2031	2051	2072	2084	2028	2041	2063	2072
Desvio padrão (±)	10	15	14		8	8	10	7

Fonte: Fagundes et al. (2025).